



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**MIKROSTRUKTURA MG-SLITIN
ZPRACOVANÝCH TECHNOLOGIÍ SLM**

MICROSTRUCTURE OF MG ALLOYS PREPARED BY SLM PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Handl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Klára Nopová

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: Jiří Handl
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Klára Nopová
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Mikrostruktura Mg–slitin zpracovaných technologií SLM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Neustálý technický pokrok klade čím dál vyšší nároky na kvalitu, geometrickou složitost a hmotnost výrobků. Aditivní technologie, jako je selektivní laserové tavení (SLM), poskytuje nové možnosti v oblasti geometrické složitosti výrobků a optimálního využití materiálu. Kombinace procesu SLM a hořčíkových slitin se jeví, z hlediska hmotnosti výrobků a využitelnosti v praxi, jako velmi perspektivní inovace. V rámci bakalářské práce student vypracuje řešerši se zaměřením na aditivní technologie. Detailně se zaměří na technologii SLM a její využití při zpracování Mg–slitin, a to zejména řady AZ. V praktické části student provede drobný experiment, kdy zanalyzuje mikrostrukturu Mg–slitiny AZ91D zpracované metodou SLM.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Metalografická analýza studované slitiny.
- 2) Vyhodnocení porozity.
- 3) Zpracování výsledků a jejich zasazení do širšího literárního rámce.

Seznam doporučené literatury:

MANAKARI, V., G. PARANDE and M. GUPTA. Selective laser melting of magnesium and magnesium alloy powders: A review. In *Metals*, 7 (2017).

WEI, K., X. ZENG, Z. WANG, J. DENG, LIU, M. G. HUANG and X. YUAN. Selective laser melting of Mg-Zn binary alloys: Effects of Zn content on densification behavior, microstructure, and mechanical property. *Materials Science and Engineering A*, 756 (2019), 226–236.

WEI, K., M. GAO, Z. WANG, and X. ZENG. Effect of energy input on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted AZ91D magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 611 (2014), 212–222.

LIU, S., W. S. YANG, X. SHI, B. LI, S. DUAN, H. GUO and J. GUO. Influence of laser process parameters on the densification, microstructure, and mechanical properties of a selective laser melted AZ61 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 808 (2019), 151–160.

ZHANG, W., L. WANG, Z. FENG and Y. CHEN. Research progress on selective laser melting (SLM) of magnesium alloys: A review. *Optik*, 207 (2020).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo zpracování rešeršní části zabývající se aditivními metodami a slitinami hořčíku, zaměřeno na slitinu AZ91D. V rámci experimentální práce byly analyzovány vzorky zpracované technologií selektivního laserového tavení (SLM), a to pod rozdílnými procesními parametry. Na jednotlivých vzorcích byla měřena plošná porozita, dále byla popsána mikrostruktura slitiny AZ91D po procesu SLM. Výsledky byly uvedeny do souvislosti s použitými procesními parametry, ale také do souvislosti s dostupnou literaturou.

Klíčová slova

Selektivní laserové tavení (SLM), Mg-slitiny, procesní parametry, porozita

Abstract

The main aim of this bachelor thesis was to research for theoretical part dealing with additive manufacturing and magnesium alloys focused on alloy AZ91D. The experimental work analyzed samples processed by Selective laser melting (SLM) technology with different process parameters. The porosity was measured on the individual samples and the microstructure of alloy AZ91D processed by SLM method was described. The results were linked to the process parameters used and, also to the available literature.

Key words

Selective laser melting (SLM), Mg-alloys, process parameters, porosity

Bibliografická citace

HANDL, Jiří. *Mikrostruktura Mg-slitin zpracovaných technologií SLM* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132884>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Klára Nopová.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Mikrostruktura Mg-slitin zpracovaných technologií SLM“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne 21.5.2021

.....

Handl Jiří

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucí mojí bakalářské práce, Ing. Kláře Nopové, za vedení, odborné rady a čas, který mi věnovala při tvorbě práce. Také bych rád poděkoval všem, kteří mne podporovali, ať už v průběhu roku nebo během celého studia.

Bakalářská práce byla realizována díky projektu ReMaP – ATCZ229 s názvem: *Výzkum slitin hořčíku pro aditivní výrobu strukturálních a biodegradabilních dílů.*

Obsah

1	Úvod.....	15
2	Aditivní technologie.....	16
2.1	Přehled aditivních technologií	16
2.1.1	Stereolitografie	17
2.1.2	Selektivní laserové spékání	18
2.1.3	Laminování.....	19
2.1.4	Depozitní modelování	20
3	Selektivní laserové tavení	21
3.1	Procesní parametry	22
3.2	Relativní hustota	22
3.3	Metalurgické vady	23
3.3.1	Tvorba kulových částic	23
3.3.2	Porozita.....	24
4	Hořčík a jeho slitiny	26
4.1	Mikrostruktura Mg-slitin po SLM	26
5	Cíle práce	29
6	Experimentální část.....	30
6.1	Vstupní materiál	30
6.2	Zpracování vzorků.....	31
6.3	Příprava metalografických výbrusů.....	32
6.3.1	Postup prací	32
7	Výsledky	34
8	Diskuze	44
9	Závěry	51
10	Seznam použité literatury	52
11	Seznam použitých zkratk a symbolů	55

1 Úvod

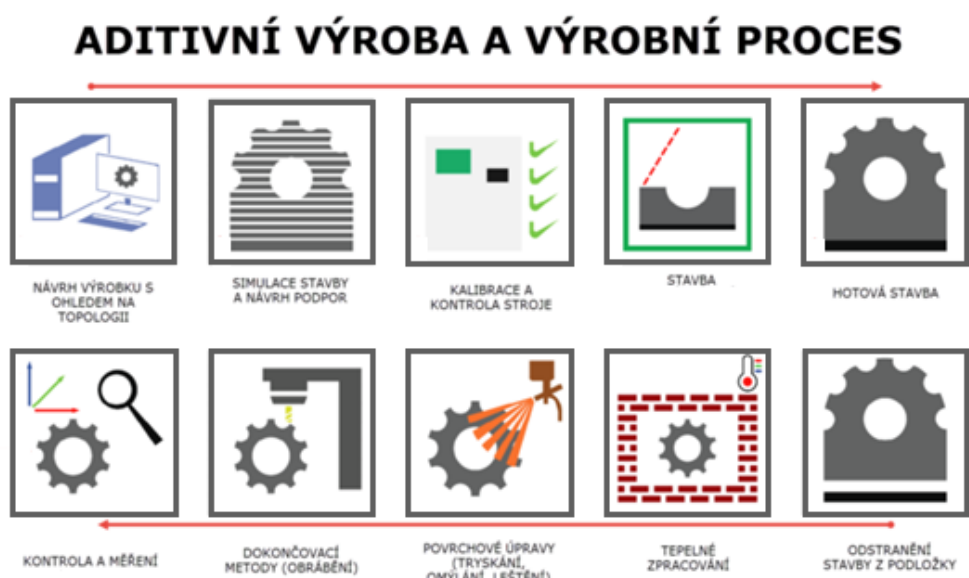
Aditivní technologie (AM – „Additive Manufacturing“) je poměrně novou metodou výroby komponent, jejíž počátky jsou v 80. letech 20. století. V současnosti jsou aditivní technologie, využívající různé materiály, na vzestupu. Využívá se především pro tvorbu konceptů a prototypů, avšak například v letectví je tato technologie využívána pro tvorbu konstrukčních součástí, lopatek turbín nebo vstřikovacích trysek za účelem snížení hmotnosti. Ve stavebnictví usnadňuje architektům vytvořit fyzický model navrhovaných součástí či budov a tím ho lépe prezentovat svým zákazníkům. V medicíně se technologie uplatňuje pro výrobu modelů poškozených kostí, díky kterým lze lépe provést analýzu a další postup zákroku. Začíná se také používat i pro výrobu implantátů, což přináší lepší rekonvalescenci i výsledný kosmetický vzhled. [1]

Princip je založen na postupném vrstvení materiálu, díky tomu lze vytvářet složité geometrické tvary a často i lepší výsledné vlastnosti součástí, oproti konvenčním metodám výroby. „Rapid prototyping“, jak se dříve nazývala aditivní technologie, má nyní více metod, které se liší způsobem zpracování i použitým materiálem. Lze tisknout z plastů, keramiky, pryskyřice, papíru i z mnoha druhů kovů a jejich slitin. [2]

Tato práce je zaměřena na hořčíkové slitiny řady AZ, zpracované metodou selektivního laserového tavení (SLM – „Selective Laser Melting“). Slitiny řady AZ jsou slitiny hořčíku s obsahem hliníku Al a zinku Zn. Hořčík, díky jeho malé hustotě (1738 kg/m^3) je jedním z nejlehčích konstrukčních materiálů. Jeho zásoby v zemské kůře nebo v oceánech jsou považovány za nevyčerpatelné. Hořčík je také biologicky vstřebatelným materiálem, proto má potenciál využití v medicíně. Avšak největší využití hořčíkových slitin je v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu. Dále je také využíván v potravinářském, elektrotechnickém i medicínském odvětví. SLM je výkonná aditivní technologie, která nabízí nové možnosti v oblasti geometrické složitosti součástí. [3]

2 Aditivní technologie

Proces AM začíná vymodelováním 3D modelu součásti pomocí softwaru CAD („computer aided desing“), následně je soubor převed do formátu STL, který 3D model rozřeže do jednotlivých 2D vrstev, podle kterých se následně řídí celý proces. Před samotným začátkem tisku součásti se musí provést nastavení a kalibrace stroje. Komponenta vzniká postupným kladením jednotlivých vrstev, které se do sebe spékají nebo se na sebe lepí (záleží na typu AM). Vrstvení materiálu probíhá tak dlouho, dokud není celá součást hotová, poté je součást oddělena od stavěcí desky a očištěna od přebytečného materiálu a podpor. Následně lze provádět tepelné zpracování, povrchové úpravy či dokončovací metody (viz obrázek 1). Tloušťka vrstvy závisí na použité technologii. Obecně platí čím tenčí tloušťka vrstvy, tím bude povrch součásti kvalitnější. [4]



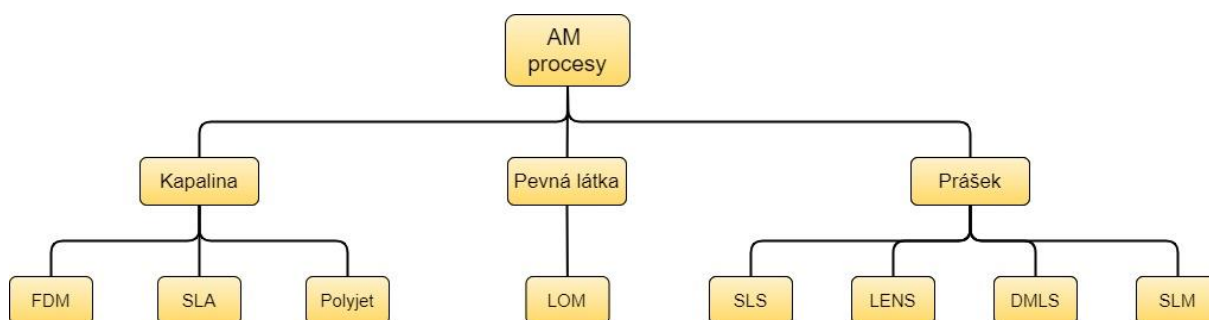
Obr. 1 Aditivní výroba a výrobní proces [4]

Výhodou AM je úspora materiálu a tím snížení nákladů na výrobu, lze také snížit hmotnost součástí vytvářením vnitřních struktur. Dále tato metoda umožňuje vytvořit i takové tvary, které by byly jen velmi obtížně vyrobitelné pomocí konvenčních metod. V některých případech však aditivní výroba nemusí být to nejlepší řešení pro výrobu součástí. Rozměry dílů jsou značně omezeny velikostí tiskáren (respektive pracovních komor) a materiály použité pro tisk jsou stále omezeny. [1]

2.1 Přehled aditivních technologií

AM rozdělujeme do tří hlavních skupin podle jejich vstupního materiálu, a tedy materiály na bázi kapaliny, pevné látky a prášku, jak lze vidět na obrázku 2. Konkrétními technologiemi jsou depozitní modelování (FDM – „Fused Deposition Modeling“), stereolitografie (SLA –

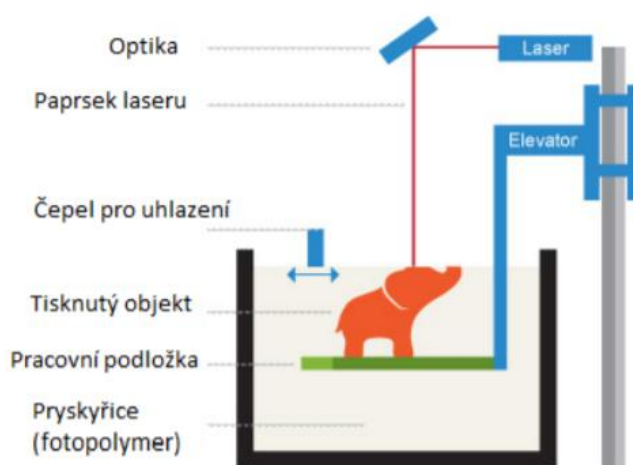
„Stereolithography“), Polyjet, laminování (LOM – „Laminated Object Manufacturing“), selektivní laserové spékání (SLS – „Selective Laser Sintering“), přímá metoda navařování laserem (LENS – „Laser Engineered Net Shaping“), přímé kovové laserové slinování (DMLS – „Direct Metal Laser Sintering“), Selektivní laserové tavení (SLM – „Selective Laser Melting“). [2]



Obr. 2 Přehled procesů AM [2]

2.1.1 Stereolitografie

Stereolitografie (SLA – „Stereolithography“) je založena na principu vytváření jednotlivých 2D vrstev na základě CAD modelu. Součást získává svůj výsledný tvar díky vytvrzování tekuté fotopolymerní pryskyřice (obrázek 3). Vytvrzování vzniká pomocí působení ultrafialového laserového paprsku. Paprsek tvoří postupně 2D vrstvy o tloušťce mezi 0,05 - 0,15 mm na stavěcí desce, která se po zhotovení dané vrstvy posune ve vertikálním směru přesně o tloušťku vrstvy níže. Při stavbě tvarově složitějších součástí je třeba použít dočasných podpor, které se po dokončení stavby manuálně odstraňují. Po dokončení tisku následuje opracování v UV komoře, kde model dostane potřebnou integritu povrchu nebo barvu. Na obrázku 3 můžeme vidět hlavní komponenty tiskárny SLA. [5, 6]



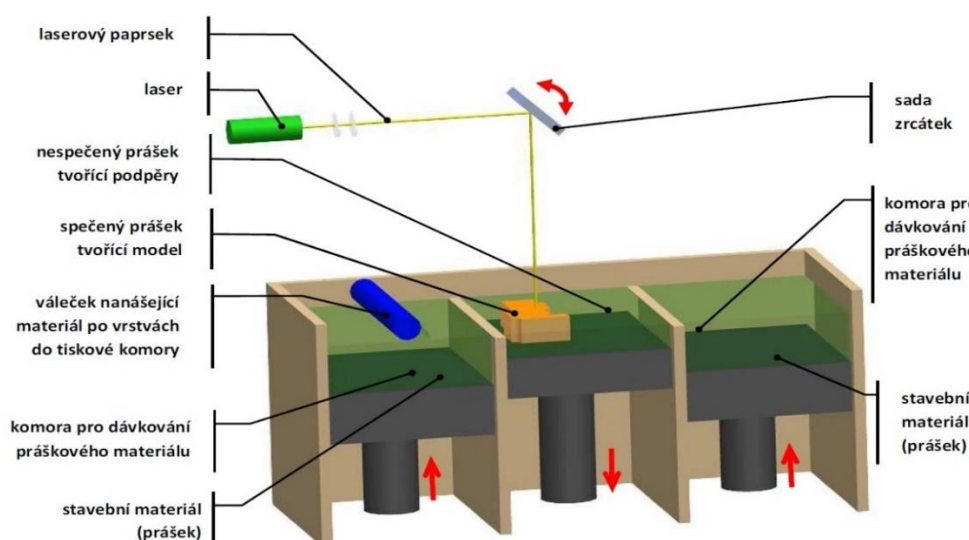
Obr. 3 Schéma procesu SLA [7]

Výhodou stereolitografie je možnost tvorby velkých a tvarově složitých modelů, které lze dále obrábět nebo použít jako formy pro další technologie. Nevýhodou je však vysoká pořizovací cena zařízení pro SLA a také používaných materiálů. Vstupním materiálem jsou pryskyřice v tekuté formě. Výsledné modely jsou poměrně křehké, a proto nejsou využívány jako funkční součásti, ale jako prototypy. Metoda je používána převážně v automobilovém průmyslu. [6]

2.1.2 Selektivní laserové spékání

Technologie selektivního laserového spékání (SLS – „Selective laser sintering“), v praxi často nazývaná „sintrování“, je opět technologií založenou na postupném kladení vrstev materiálu. Jednotlivé vrstvy se vytvářejí nanesením a zarovnáním prášku materiálu na určitou tloušťku po celé ploše stavěcí desky. Na každé vrstvě dojde ke spečení prášku pomocí CO₂ laseru, a to pouze v místech právě vytvářeného řezu součásti. Okolní materiál zůstává nespečen a slouží jako podpora. Po dokončení spékání jedné vrstvy se stavěcí deska posune směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy a celý proces se opakuje. Na obrázku 4 můžeme vidět schéma tiskárny pro SLS metodu. [8, 9]

Po dokončení procesu je potřeba odstranit přebytečný prášek kartáčováním a následným otryskáním. Vstupní materiál ve formě prášku je nejčastěji termoplast (Polyamid 12), který může být s příměsí uhlíkových, skleněných nebo hliníkových vláken, pro zlepšení mechanických a tepelných vlastností tištěného dílu. Součásti mají zrnitý a drsný povrch, který lze zlepšit následnými koncovými úpravami povrchu, jako jsou leštění, barvení nebo lakování. Také můžeme zlepšit vlastnosti součásti pokovením nebo vodotěsným povlakem. [5, 8, 9]



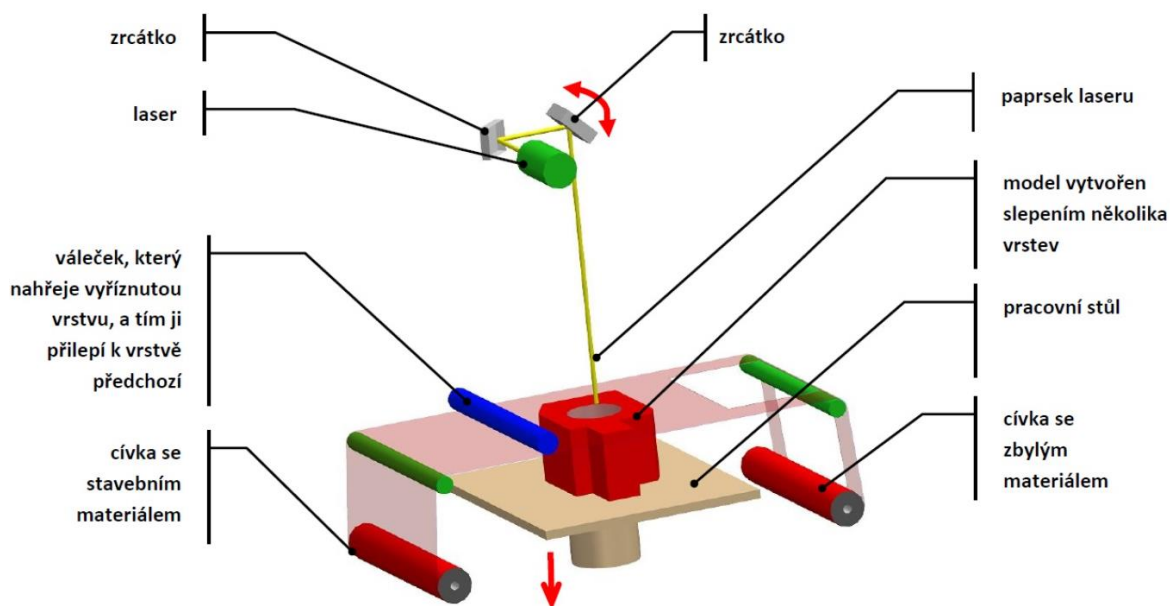
Obr. 4 Schéma procesu SLS [10]

2.1.3 Laminování

Součásti vyrobené technologií „Laminated object manufacturing“ (LOM) často slouží pro vizualizaci, marketing a prezentaci nových výrobků firem. Vstupním materiálem jsou fólie z plastů, papírů nebo méně často z kovu a keramiky. Fólie jsou z jedné strany potaženy lepidlem, které slouží jako pojivo mezi jednotlivými vrstvami. Pevnost modelu je závislá na použitém pojivu. Výhodou této metody je nízká cena používaných materiálů a také absence ochranné atmosféry. Metoda však není ideální pro vytváření geometricky složitých tvarů. [5, 11]

Stejně jako u všech ostatních aditivních technologií, i zde musí být objekt nejprve vymodelován v softwaru CAD a následně převeden do formátu kompatibilního s daným zařízením. Samotný proces, znázorněný na obrázku 5, probíhá postupným přiváděním fólie z válečkového podávajícího systému do místa konstrukční platformy. Pomocí ohřívacího válce se roztaví lepidlo a přitlačí se na plošinu. Dále laser nebo čepel vytvoří tvar dané součásti a část přebytečného materiálu je rozřezána na jednotlivé kvádry, které slouží jako podpěry. Zbytek fólie je odveden z místa procesu pryč. Následně se konstrukční platforma sníží o tloušťku materiálu a výrobní proces se opakuje, dokud se nevytvoří celá komponenta. [5, 11]

Jakmile je součást hotová, podpěry se mechanicky odstraní a součást lze dokončit úpravou povrchu. Povrch součásti je třeba ošetřit silikonovým, uretanovým nebo epoxidovým nástřikem, aby byl model chráněn před vlhkostí. Papírové modely lze ošetřit barvou nebo lakem. [11]

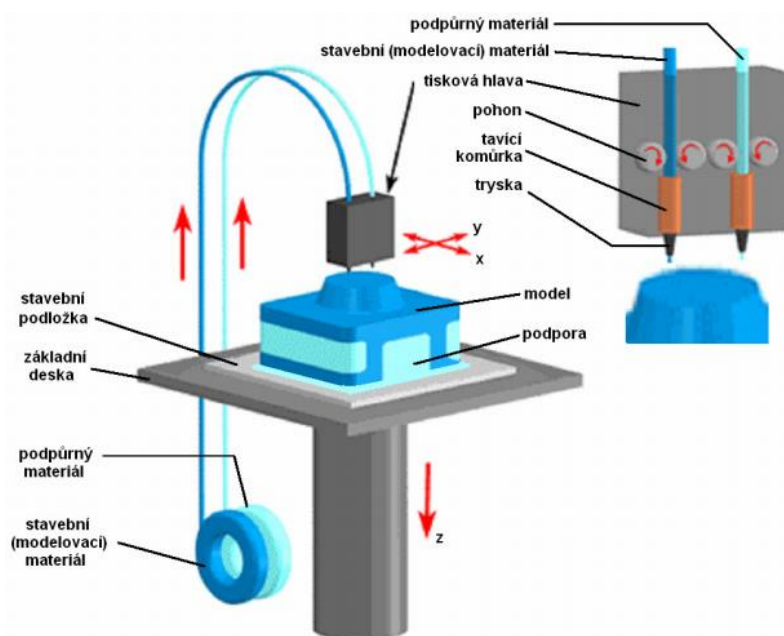


Obr. 5 Schéma procesu LOM [10]

2.1.4 Depozitní modelování

„Fused Deposition Modeling“ (FDM) je nepoužívanější a nejznámější technologií 3D tisku, vzhledem k cenové dostupnosti na trhu. Stolové 3D tiskárny jsou vhodné i pro osobní použití. Metoda nevyžaduje ochranné prostředí, tudíž nemusí být v uzavřené komoře a díky tomu jsou přístroje rozměrově malé. Materiály použité v tomto procesu jsou hlavně termoplasty, například: polykarbonát (PC), akrylonitril-butadien-styren (ABS) nebo Polyfenylsulfon (PPSF). Na podpory lze použít rozpustný materiál polyvinylalkohol (PVA). [2, 12]

Jedná se o proces, při kterém je vstupní materiál v podobě tenké plastové struny přiveden pomocí podavače do tiskové hlavy, která materiál nataví a vytlačí na stavěcí desku. Na stavěcí desce se tvoří jednotlivé vrstvy součástí. Po každém vytisknutí jedné vrstvy se tryska posune nahoru ve směru osy Z a provede tisk následující vrstvy modelu. Při tvorbě tvarově složitých součástí je potřeba tvorba podpor. Po vytisknutí celé součásti se mechanicky nebo chemicky podpory odstraní. Lze tvořit součásti vícebarevné nebo z různých materiálů, a to za pomoci přístrojů s více tryskami. Popis tiskárny FDM lze vidět na obrázku 6. [2, 5, 12]



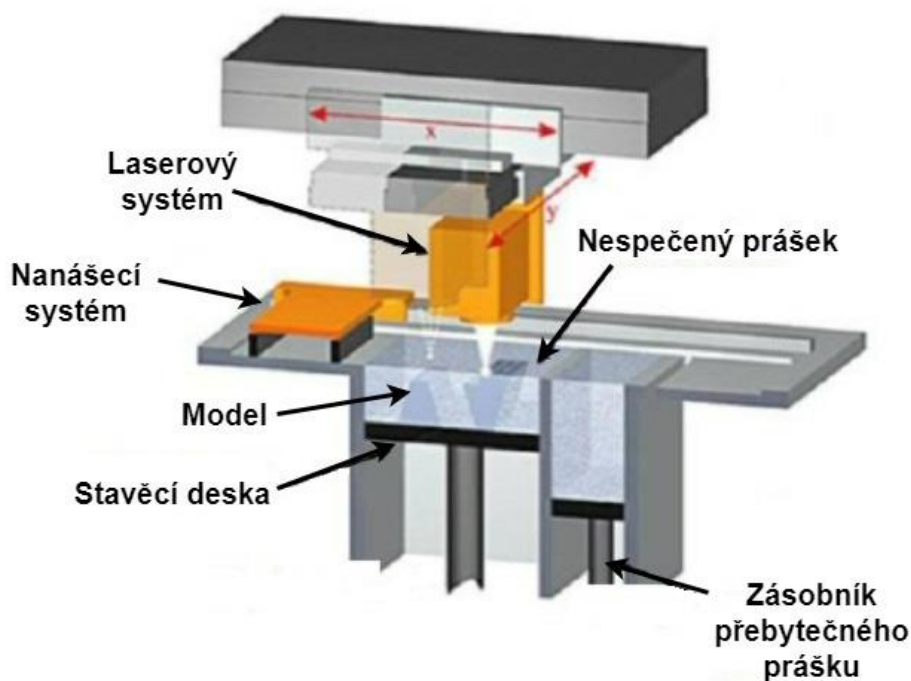
Obr. 6 Schéma procesu FDM [13]

Technologie FDM je vhodná pro prototypování náhradních dílů, funkčních modelů a výrobních nástrojů, u kterých nepožadujeme výraznou kvalitu povrchu. Povrch lze ovlivnit tloušťkou vrstev, avšak tím prodloužíme výrobní čas. Případně je možné vytištěné díly dále povrchově upravovat dokončovacími metodami, jako je broušení, leštění, lakování. Při výrobě vzniká minimální odpad, pouze z podpor. [5, 12]

3 Selektivní laserové tavení

Selektivní laserové tavení (SLM – „Selective laser melting“) je aditivní technologie, která využívá energie koncentrovaného laserového paprsku k roztavení vstupního práškového materiálu. Výhodou této metody je možnost vytvořit součásti se složitou geometrií, které nelze vytvořit konvenčními technologiemi. Další výhodou je téměř nulový odpad při výrobě. Nenatavený prášek se recykluje a je možné ho dále používat. Systém SLM tvoří laser, stavěcí deska, systém pro automatické dávkování prášku a řídicí počítač. Celý pracovní proces probíhá v uzavřené komoře, která je vyplněna inertním plynem (Ar, N₂). Ten zabraňuje, aby kovový výrobek podléhal oxidaci a zachycení vodíku. Běžné materiály využívané pro proces SLM jsou slitiny Fe, Ti, Co-Cr, Ni, Al, Mg, Cu a Zn. [1]

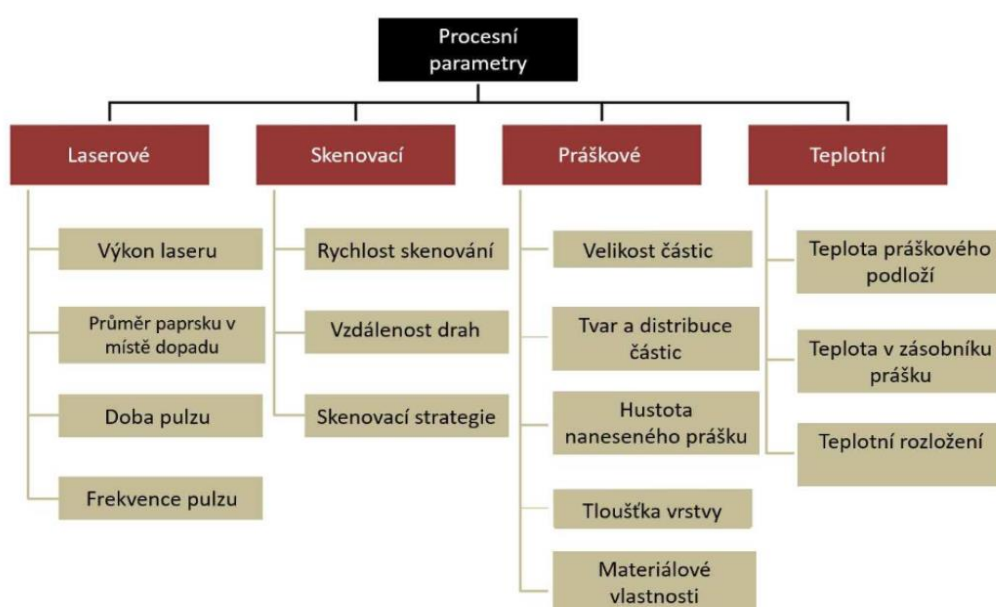
Celý výrobní proces začíná vymodelováním modelu v softwaru CAD a převedením do příslušného programu, který model pomyslně rozřeže na vrstvy o dané tloušťce. Přístroj pro tisk SLM musí být správně optimalizován, aby se minimalizovaly nežádoucí jevy v materiálu, jako jsou trhliny, porozita nebo tvorba kulových částic tzv. „balling effect“. Při procesu SLM se především optimalizuje výkon laseru, rychlost skenování, strategie skenování a tloušťka vrstvy prášku. Samotný tisk součásti začíná nanášením první vrstvy vstupního materiálu na stavěcí desku. Tloušťka vrstvy prášku závisí na velikosti částic prášku, zpravidla 20 – 100 µm. Následuje skenování laserem, který přeměnou energie na teplo roztaví prášek a vytvoří tvar dané vrstvy. Po dokončení skenování jedné vrstvy se platforma posune ve směru osy Z, směrem dolů přesně o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje, a to do doby vytisknutí kompletní součásti. Schéma procesu výroby SLM je znázorněno na obrázku 7. [1]



Obr. 7 Schéma procesu SLM [14]

3.1 Procesní parametry

Jedním z hlavních cílů SLM je dosažení maximální relativní hustoty materiálu u vytvořených kovových součástí. Proto je důležité správně optimalizovat procesní parametry SLM, aby se předešlo nežádoucím jevům spojených s procesem. Častými vadami jsou porozita, tvorba kulových částic tzv. „balling effect“, teplotní fluktuace, ztráta legujících prvků a tvorba strusky v tavenině, což může vést ke špatnému propojení vrstev, nízké relativní hustotě i tvorbě trhlin. Jednotlivé procesní parametry dělíme do čtyř hlavních skupin, jsou to parametr laseru, skenování, prášku a teploty, jak můžeme vidět ve schématu na obrázku 8. Tyto skupiny jsou na sobě závislé a navzájem se ovlivňují. Správnou optimalizací procesních parametrů pak můžeme dosáhnout požadovaného povrchu součásti, mikrostruktury i mechanických vlastností. [1, 15]



Obr. 8 Rozdělení procesních parametrů [15]

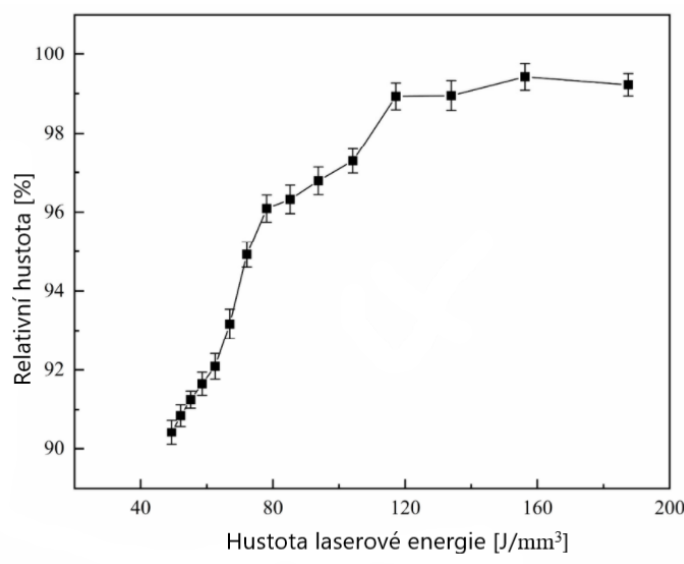
3.2 Relativní hustota

Výsledná relativní hustota součásti při výrobě technologií SLM má velký vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Snahou je vyrábět součásti s maximální relativní hustotou, tedy 100 %. Toho lze dosáhnout úplným zabráněním tvorby metalurgických vad v součásti, a to zejména tvorbě pórů a trhlin. Velký vliv na relativní hustotu má správná optimalizace procesních parametrů. Zavedením parametru hustota laserové energie lze snadněji určovat vliv vstupních podmínek na výslednou strukturu. Ta je definována vztahem:

$$E = \frac{P}{v * h * t} \quad [\text{J}/\text{mm}^3] \quad (1)$$

kde P je výkon laseru [W], v rychlost skenování [$\text{mm} * \text{s}^{-1}$], h vzdálenost jednotlivých šraf [mm] a t je tloušťka vrstvy prášku [mm].

Hustota laserové energie je parametrem, díky kterému lze snadněji získat závislost na relativní hustotě. Nelze však říct, že stejná vstupní hustota laserové energie bude mít na relativní hustotu stejný vliv při různých procesních parametrech nebo různých materiálech. Z obrázku 9 je patrné, že tisk součásti ze slitiny AZ61 při vyšší vstupní hustotě laserové energie zvyšuje relativní hustotu materiálu. Nejvyšších hodnot relativní hustoty bylo dosaženo v rozmezí 150 – 160 J/mm³ vstupní hustoty laserové energie, při dalším zvyšování energie relativní hustota mírně klesá v důsledku vzniku mikrotrhlin. [1, 16, 17]



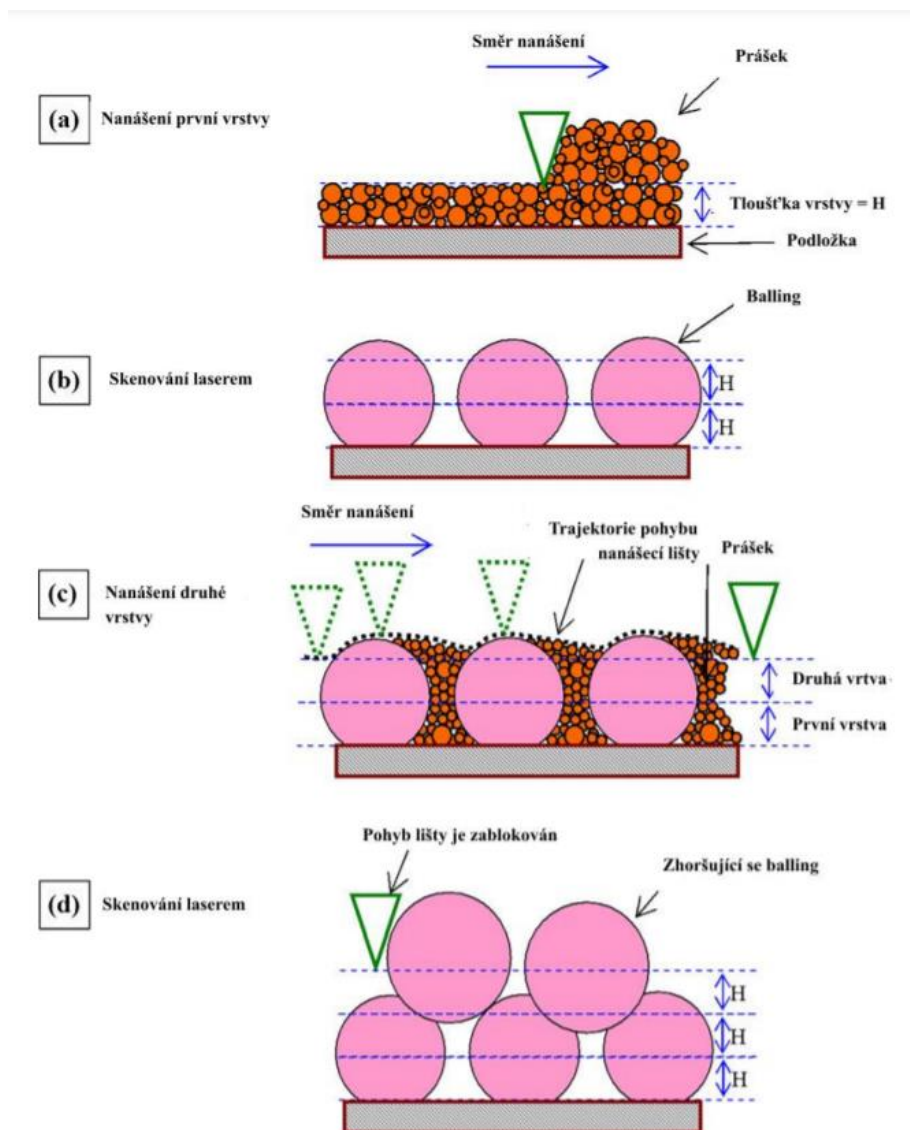
Obr. 9 Závislost vstupní hustoty laserové energie na relativní hustotě u materiálu AZ61 [16]

3.3 Metalurgické vady

3.3.1 Tvorba kulových částic

Tvorba kulových částic tzv. „balling effect“ je jednou z typických mikrostrukturních vad při výrobě součásti technologií SLM. Příčinou bývá nízký výkon laseru, vyšší skenovací rychlost a velká tloušťka vrstvy prášku, což vede k poklesu vstupní hustoty laserové energie a následnému vystříknutí malých kapiček kapaliny z povrchu roztavené směsi v důsledku vysoké povrchové energie. Dalším negativním faktorem při tvorbě kulových částic je oxidace. Studie [19] o zpracování SLM prášků nerezové oceli a Ni zjistila, že při hladině kyslíku 0,1 %, vysokém výkonu laseru a nízké rychlosti skenování lze výrazně snížit tvorbu tzv. „balling effectu“. [1]

Tvorba kulových částic má negativní dopad na povrch, kde tvorba kuliček zvyšuje drsnost povrchu a je tedy zapotřebí dokončovacích povrchových úprav, při kterých může docházet k rozměrovým nepřesnostem. Také dochází ke tvorbě pórů v meziprostorech kulových částic, což má negativní dopad na relativní hustotu součástí. V extrémních případech může dojít k vytvoření větších kovových kuliček, které sahají nad práškovou vrstvu a brání rovnému nanášení práškové vrstvy, jak je znázorněno na obrázku 10. [1]



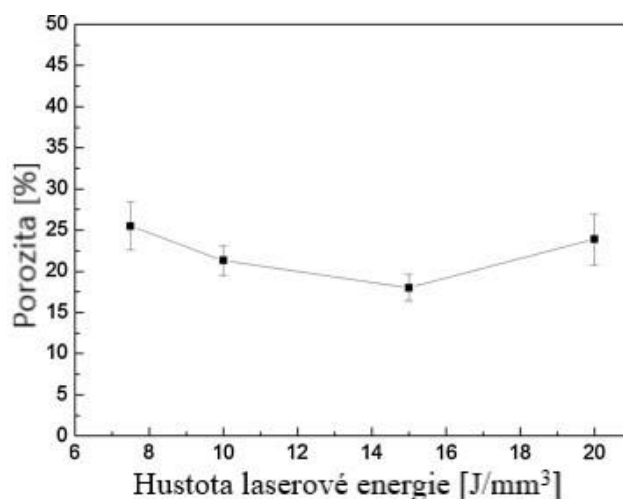
Obr. 10 Zvětšování kulových částic do stavu zaseknutí pohybu nanášečí lišty [18]

3.3.2 Porozita

Porozita je charakteristickou vadou pro součásti vyrobené pomocí AM, která má vliv na výsledné mechanické vlastnosti, a také na relativní hustotu součásti. Tvorba pórů je převážně závislá na procesních parametrech. Póry mohou vznikat více způsoby, jako například: špatnou kvalitou vstupního práškového materiálu, nevhodnou velikostí energie laseru nebo velkou vzdáleností jednotlivých šraf laseru. [1, 17, 20]

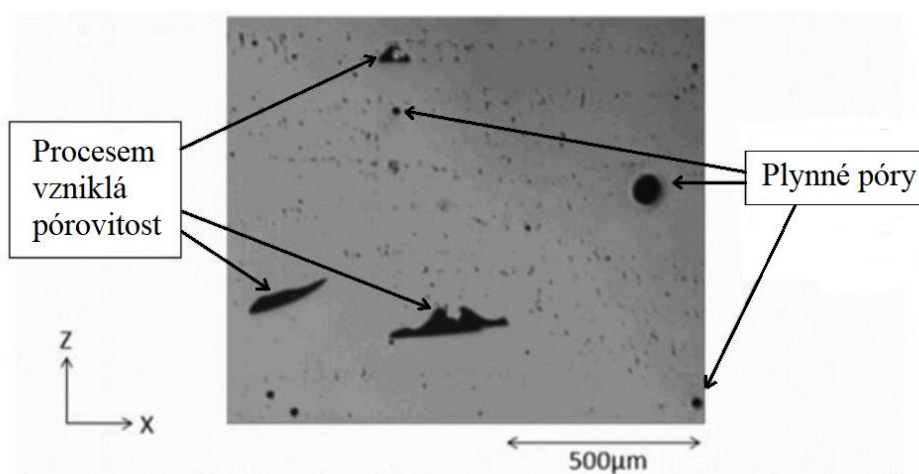
Při špatné kvalitě vstupního práškového materiálu vznikají tzv. „plynné póry“ (obrázek 12), které jsou charakteristické kulovým tvarem. Tyto póry vznikají jednak při samotné výrobě prášku (atomizaci), ale také při samotném tisku součásti dochází k zachycení inertního plynu do roztaveného materiálu. Vliv na porozitu má také velikost částic práškového materiálu. Při odlišných velikostech částic prášků dochází k různému chování během zpracování. Velké práškové částice se taví pomaleji než menší, a proto může docházet pouze k částečnému roztavení kovového prášku, což vede k tvorbě pórů. [1]

Hustota vstupní energie laseru má na porozitu a povrch součásti velký vliv. Při nízkém výkonu laseru a vysoké rychlosti skenování je přiváděná hustota energie nízká. V důsledku toho dochází ke vzniku pórů nedostatečným roztavením a špatnou smáčivostí směsi. Autor Zhang [21] studoval ve své práci vliv vstupní hustoty laserové energie na hustotu součásti ze slitiny Mg-9% Al. Bylo pozorováno, že nejlepších výsledků vzhledem k porozitě, a to 18 %, bylo dosaženo při výkonu laseru $P = 15 \text{ W}$ a rychlosti skenování $v = 0,02 \text{ m/s}$. Při zvýšení i snížení celkové hustoty energie dochází k růstu porozity, jak můžeme vidět na obrázku 11. [1, 20]



Obr. 11 Závislost vstupní hustoty laserové energie na porozitě u slitiny Mg-9% Al [21]

Významný vliv na výslednou porozitu má také tloušťka vrstvy prášku. Při použití vyšší vrstvy je stejné množství laserové energie vystavováno většímu množství materiálu. To má za následek vytvoření dutin tzv. „lack of fusion porosity“ (obrázek 12), při přivedení nedostatečné laserové energie do práškového lože a neúplném roztavení práškových částic. To vede k vytvoření součásti s více póry a dutinami, a tím menší relativní hustotou. Také může dojít k neprotavení celé vrstvy a tím ke špatnému propojení jednotlivých vrstev, což negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti. [1]



Obr. 12 Porozita vzniklá procesem SLM a plynné póry [22]

4 Hořčík a jeho slitiny

Nebudeme-li brát v úvahu prvek beryllium, který je toxický, pak hořčík považujeme za nejlehčí známý konstrukční materiál. Díky jeho dobrému tlumení, biokompatibilitě, recyklovatelnosti a nízké hustotě ($1\,738\text{ kg/m}^3$) je využíván především pro snížení hmotnosti konstrukcí v leteckém, automobilovém, kosmickém nebo vojenském průmyslu. Ačkoli hořčík není považován za vzácný kov, jeho cena je poměrně vysoká, a to z důvodu náročnosti technologií výroby. [3, 23]

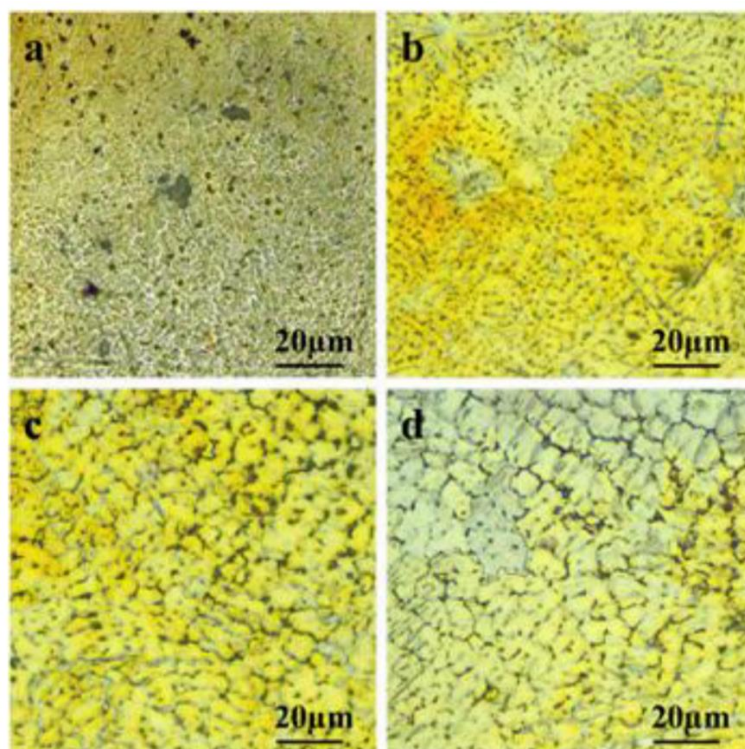
Při využívání hořčíku je však nutné zohlednit jeho relativně nízkou pevnost, špatnou tažnost nebo odolnost proti korozi. Tyto nedostatky však lze zlepšit pomocí legujících prvků. Mezi nejčastější legury Mg-slitin patří hliník a zinek, typicky: AZ91 (9 hm.% Al, 1 hm.% Zn), AZ81 (8 hm.% Al, 1 hm.% Zn), AZ63 (6 hm.% Al, 3 hm.% Zn). Tyto slitiny mají vyšší pevnost i odolnost proti korozi. Avšak zlepšením některých vlastností, například pevnosti, může dojít ke zhoršení jiných, jako například tažnosti. [3, 23]

4.1 Mikrostruktura Mg-slitin po SLM

Vlastnosti mikrostruktury daného materiálu zásadně ovlivňují mechanické vlastnosti. Při výrobě součástí z hořčíku pomocí technologie SLM tomu nebude jinak. Mikrostruktura materiálu SLM procesu je závislá především na velkých teplotních gradientech při vysoké rychlosti ohřevu a chlazení. Teplotní historii však ovlivňuje několik procesních parametrů, je tedy náročné určit přesnou závislost mikrostrukturních vlastností na tepelné historii. [1, 17]

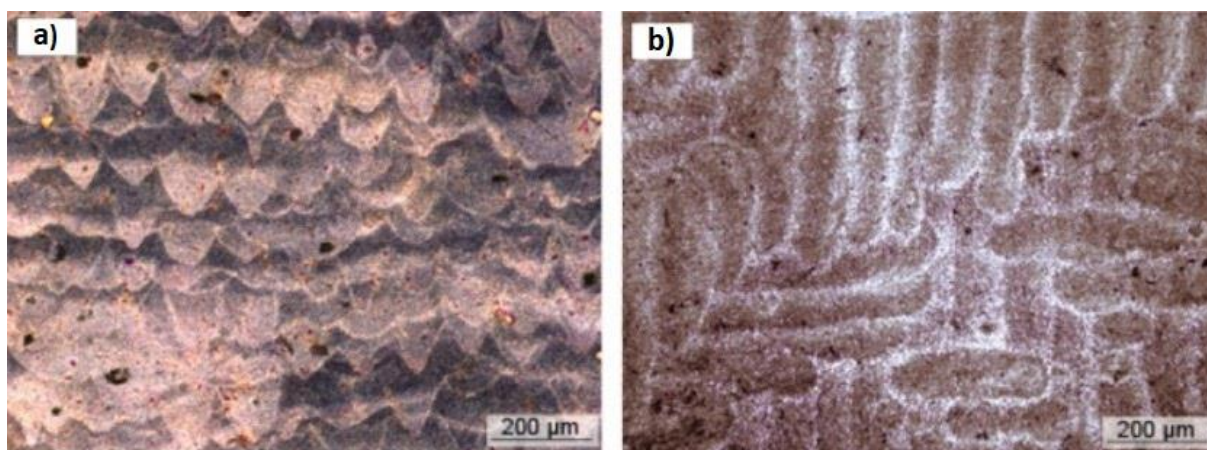
Vyšší rychlost skenování v kombinaci s nižším výkonem laseru přivádí nižší vstupní hustotu laserové energie na horní část prášku. To vede k tvorbě velice jemnozrnné mikrostruktury v důsledku vyšší rychlosti chlazení taveniny. Naopak při nižších skenovacích rychlostech dochází k prodloužení interakce laserového paprsku s práškem, a tedy prodloužení doby tuhnutí taveniny. V důsledku nižší rychlosti chlazení je doba růstu zrn delší a dochází k tvorbě hrubozrnnější mikrostruktury. [1, 17]

Autoři [1] pozorovali vliv vstupní hustoty laserové energie na velikost zrn. Na snímcích mikrostruktury materiálu ZK60 zpracovaného technologií SLM (obrázek 13a) při vstupní hustotě laserové energie 420 J/mm^3 lze vidět velmi jemnozrnnou mikrostrukturu. Na obrázku 13b zrna mírně zhrubly s vyšší vstupní laserovou energií 500 J/mm^3 . Při dalším zvýšení vstupní hustoty energie na 600 J/mm^3 (obrázek 13c) a 750 J/mm^3 (obrázek 13d) lze pozorovat výraznější zhrubnutí zrn mikrostruktury. [1]



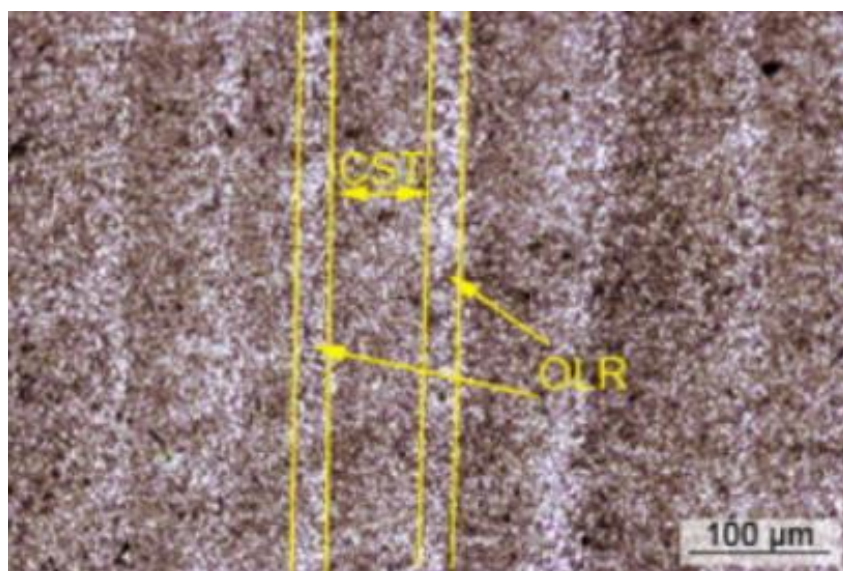
Obr. 13 Mikrostruktura materiálu ZK60 zpracovaného v různých hustotách laserové energie: a) 420 J/mm^3 , b) 500 J/mm^3 , c) 600 J/mm^3 , d) 750 J/mm^3 [1]

Mikrostruktura součásti po zpracování technologií SLM je při pohledu na rovinu kolmou ke směru stavby (rovinu XY) typická zobrazením skenovacích stop, jak je zobrazeno na obrázku 14b. Pro kvalitnější propojení vrstev je u každé vrstvy pootočen směr skenování. Při pohledu na mikrostrukturu rovnoběžné roviny XZ se směrem stavby na obrázku 14a lze vidět SLM buňky s eliptickým tvarem ohraničené fúzními hranicemi. Hloubka SLM buňky je vícenásobná tloušťce vrstvy, proto je každá vrstva přetavována více než jednou. Vícenásobné přetavování vede ke zlepšení kvality propojení vrstev a výrazně ovlivňuje tvorbu mikrostruktury vzorku. [24]



Obr. 14 Mikrostruktura materiálu AZ91D a) rovina XZ, b) rovina XY [24]

Obrázek 15 [24] zobrazuje detailní snímek obrázku 14b. Jak lze vidět, mikrostruktura je tvořena dvěma oblastmi, a to oblastí překrytí mezi sousedními laserovými stopami (ORL – „overlapping region“) a oblastí středu laserových stop (CST – „center of scanning track“). Oblast ORL je vytvářena za účelem dosažení kvalitnějšího metalurgického spojení. Vzdálenost středů dvou sousedních laserových drah by tedy měla být menší než šířka laserové stopy. Rozdílnost mikrostruktury oblastí ORL a CST je zapříčiněna rozdílnou tepelnou historií obou oblastí. [24]



Obr. 15 Detailní snímek mikrostruktury slitiny AZ91D s vyznačenými oblastmi ORL („overlapping region“) a CST („center of scanning track“) [24]

5 Cíle práce

V rámci bakalářské práce budou připraveny a zanalyzovány vzorky ze slitiny AZ91D, zpracované metodou SLM. Jednotlivé vzorky budou zpracovány pod různými procesními parametry SLM procesu.

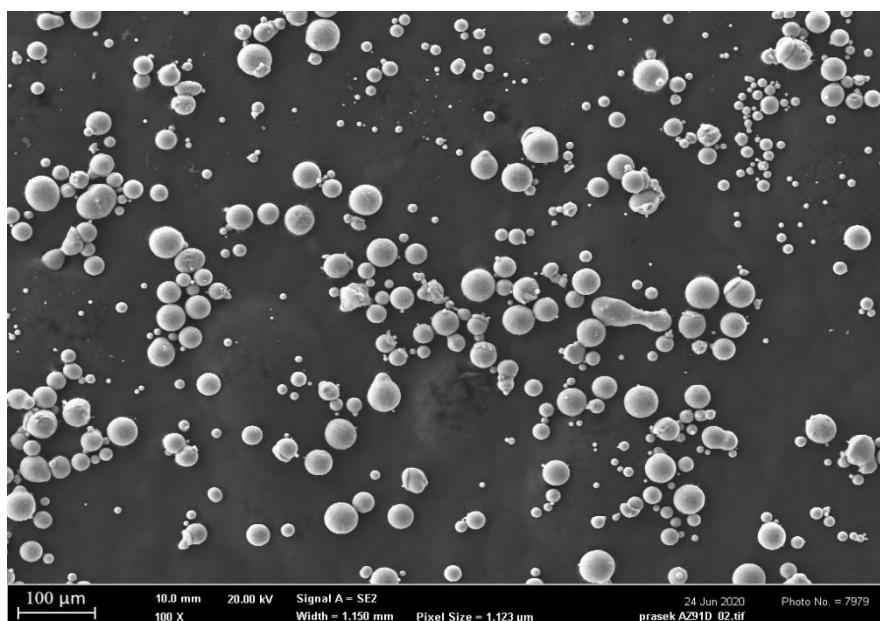
Parciální cíle práce:

- Vyhodnocení plošné porozity jednotlivých vzorků
- Popis mikrostruktury studované slitiny zpracované SLM procesem
- Zpracování výsledků a jejich zařazení do širšího literárního rámce

6 Experimentální část

6.1 Vstupní materiál

Pro experiment byl použit prášek hořčíkové slitiny AZ91D dodaný od firmy Dome metals CO., LTD., Čína. Chemické složení, které garantuje výrobce, bylo ověřeno pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM – „Scanning Electron Microscope“) metodou EDS („Energy-Dispersive Spectroscopy“). Naměřené hodnoty chemického složení souhlasí s hodnotami garantovanými výrobcem, jak lze vidět v tabulce 1. Měření velikosti práškových částic bylo provedeno na přístroji Horiba LA-950. Zjištěna střední velikost práškových částic je 37 μm . Distribuce velikosti částic prášku se pohybuje v rozmezí 21,8 μm až 57 μm . Snímek prášku na obrázku 16 byl pořízen na skenovacím elektronovém mikroskopu Zeiss Ultra Plus, lze vidět převážně kulové práškové částice.



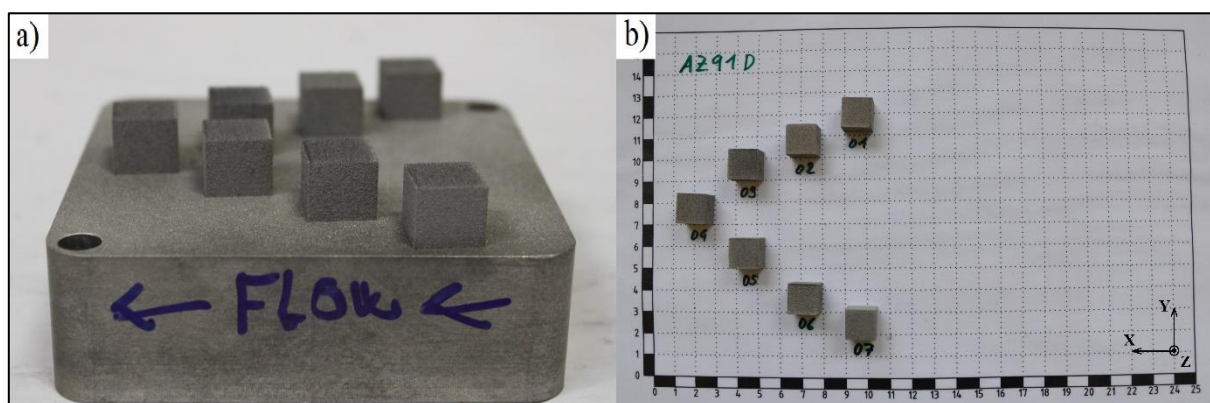
Obr. 16 Prášek Mg-slitiny AZ91D (SEM)

Tab. 1 Chemické složení prášku AZ91D

Prvek		Al	Zn	Mn	Fe	Be	Si	Cu	Ni	Cl	Mg
Hodnoty garantované výrobcem	[hm.%]	9,08	0,65	0,23	0,0021	0,0008	0,038	0,003	0,001	0,0018	89,93
Hodnoty naměřené pomocí SEM	[hm.%]	8,09	0,55	0,22				0,37			90,77

6.2 Zpracování vzorků

Tisk vzorků byl proveden na stroji SLM 280HL od firmy SLM Solution GmbH, Německo. Vytisknuto bylo sedm kostek ze slitiny AZ91D o rozměrech $13 \times 13 \times 11$ mm. U každé kostky byly použity rozdílné procesní parametry, uvedené v tabulce 2. Tisk proběhl v ochranné atmosféře inertního plynu argonu, směr proudění je znázorněn na obrázku 17a. Vzorky byly stavěny na stavěcí desce vyrobené z lité AZ91. Stavěcí deska o rozměrech 98×98 mm byla, před tiskem, přehřátá na teplotu 135°C . Tisk byl proveden strategií „Meander“ s rotací 67° mezi jednotlivými vrstvami prášku, tloušťka jedné vrstvy prášku byla $50\ \mu\text{m}$. Rozmístění vzorků na stavěcí desce je znázorněno na obrázku 17a. Na obrázku 17b jsou jednotlivé vzorky odřezány a očíslovány.



Obr. 17 a) Pozice vzorků na stavěcí desce se směrem proudění inertního plynu (značeno „flow“), b) odřezané a očíslované vzorky

Tab. 2 Aplikované procesní parametry SLM procesu

Číslo vzorku	Výkon laseru	Rychlost skenování	Vzdálenost laserových drah	Tloušťka vrstvy prášku	Překrytí jednotlivých drah	Hustota laserové energie
	[W]	[mm/s]	[mm]	[mm]	[%]	[J/mm ³]
1	150	475	0,108	0,05	50	58,48
2	210	475	0,176	0,05	30	50,53
3	210	750	0,110	0,05	50	50,91
4	150	750	0,137	0,05	30	29,20
5	180	612,5	0,133	0,05	40	44,19
6	180	805	0,120	0,05	40	37,27
7	138	612,5	0,120	0,05	40	37,01

6.3 Příprava metalografických výbrusů

Před samotným vyhodnocením porozity a pozorováním mikrostruktury je zapotřebí vzorky náležitě připravit. Vzorky musí být zbaveny veškerých nečistot, škrábanců a vrypů, aby bylo možné získat výslednou plošnou porozitu bez ovlivnění výsledků. Příprava vzorků je prováděna vícenásobným broušením a leštěním. Pro pozorování mikrostruktury je potřeba vzorek naleptat.

6.3.1 Postup prací

Popis vzorků

Jako první byly vzorky popsány přiřazenými čísly dle tabulky 2 a obrázku 17b, aby nedošlo k jejich záměně, a tím ovlivnění celého experimentu. Vyznačen byl také směr proudění inertního plynu.

Lisování

Vzorky byli za zvýšené teploty a tlaku zalisovány do puků takovým způsobem, aby byla pozorovatelná rovina XY. Na spodní část puku byla použita syntetická pryskyřice MultiFast Green a na vrchní část metylmetakrylátová pryskyřice Dentacryl. Lisování proběhlo na poloautomatickém lisu Opal X-press X-P50, při teplotě 180 °C a tlaku 250 bar po dobu 10 minut a ochlazování na pokojovou teplotu po dobu 4 minut.

Broušení

Broušení je prováděno za účelem vyrovnaní povrchu vzorku a odbroušením dostatečného množství materiálu. Nesmí však dojít ke změně nebo tepelnému ovlivnění struktury. Broušení bylo tedy provedeno pod vodou na přístroji Struers Pedemin-2. Jako brusné nástroje byly zvoleny brusné papíry SiC od firmy Struers o zrnitosti 800, 1200, 2400 a 4000 v tomto pořadí. Broušení bylo prováděno v jednotlivých intervalech 2 – 3 minut.

Leštění

Pro získání zrcadlově lesklého povrchu a povrchu bez rýh a škrábanců je zapotřebí vzorek leštit. Leštění bylo prováděno mechanicky na přístroji Struers Pedemin-2. Při použití lešticího plátna, jako lešticí pasta, byla použita diamantová pasta a jako smáčedlo byl použit ethanol. Vzorek byl nejprve leštěn 2 × 8 minut při použití lešticího plátna a pasty o zrnitosti 3 μm. Následně bylo použito jiné lešticí plátno a diamantová pasta o zrnitosti 0,7 μm, doba leštění byla 2 × 6 minut.

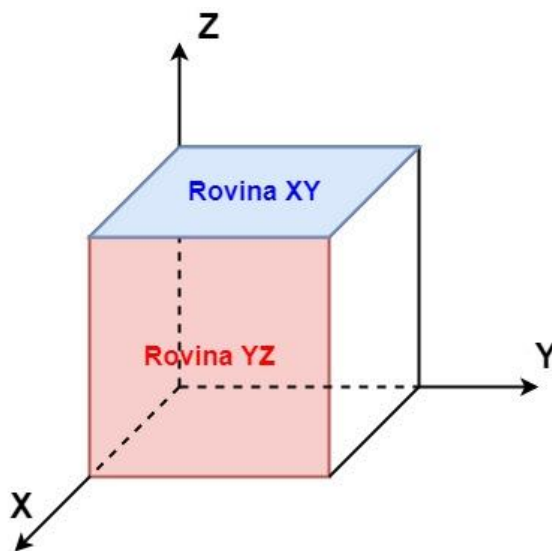
Leptání

Za účelem zviditelnění mikrostruktury materiálu byl vzorek naleptán. Leptání bylo provedeno chemicky po velmi krátkou dobu cca 5 sekund. Jako leptadlo byl použit Nital 2 % (Kyselina dusičná 2 % + ethanol 98 %).

Pozorování a dokumentace

Nejprve byla pozorována porozita, a to na nenaleptaném vzorku. U všech vzorků byla pozorována vrchní plocha vzorku, rovina XY (viz obrázek 18). Přehledové snímky roviny XY jednotlivých vzorků byly pořízeny na mikroskopu Zeiss Observer.Z1m při zvětšení 2,5 ×,

zároveň zde byli měřeny velikosti pórů pomocí funkce softwaru mikroskopu. Následně byla porozita vyhodnocena na přehledových snímcích pomocí softwaru ImageJ. Vzorek s nejnižší porozitou (nejvyšší relativní hustotou) byl naleptán a byla u něj pozorována mikrostruktura v rovině XY. Následně byl tento vzorek vylomen z puku, znovu připraven (dle postupu prací kap. 6.3.1) a pozorován v rovině YZ, rovina rovnoběžná se směrem stavby (obrázek 18). Mikrostruktura a detailní snímky byly foceny na světelném mikroskopu Olympus GX51.

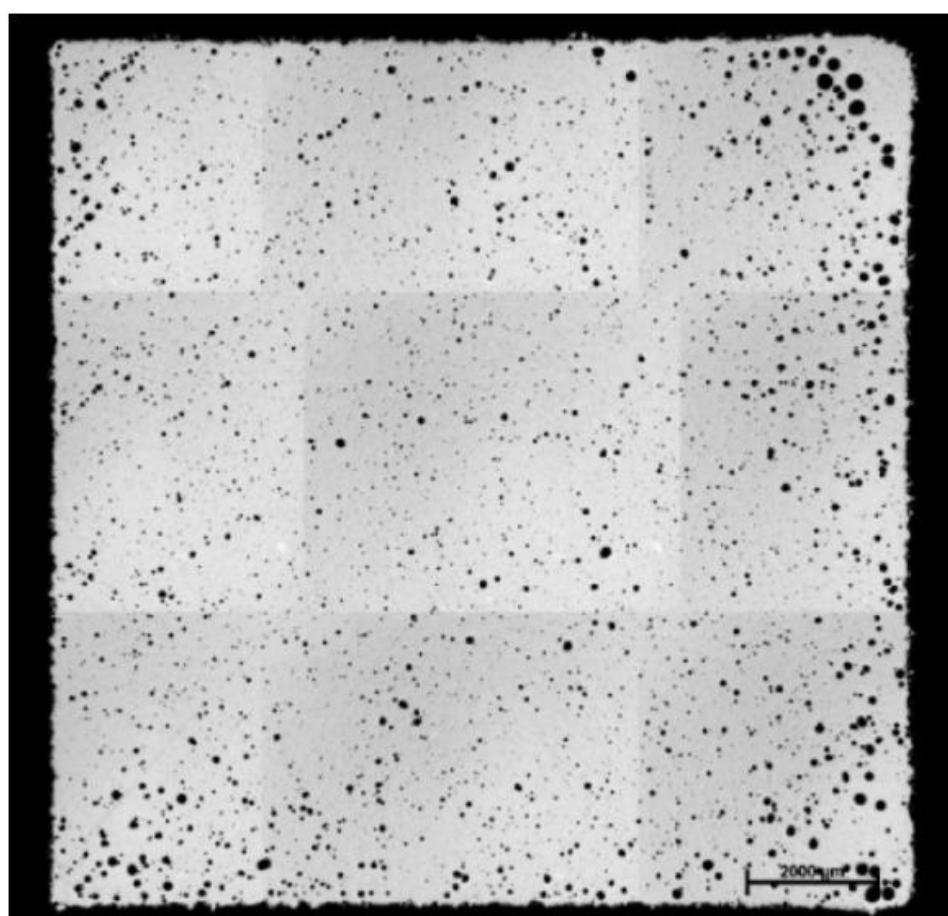


Obr. 18 Souřadný systém s vyznačenými pozorovanými plochami (osa Z tototážná se směrem stavby)

7 Výsledky

Jak již bylo zmíněno, u všech vzorků po leštění byla pozorována a následně vyhodnocena plošná porozita. V softwaru ImageJ bylo u každého vzorku provedeno minimálně 6 měření, ze kterých byla pomocí aritmetického průměru získána výsledná hodnota plošné porozity vzorku.

Na obrázku 19 je přehledový snímek vzorku č. 1. Výsledná naměřená hodnota porozity vzorku je 3,943 %. Na snímku lze vidět, že je zde výskyt převážně plynných, kulových pórů, které jsou v rozmezí velikostí 25 – 235 μm . Oblast středu vzorku je pokryta spíše menšími póry, zatímco po okrajích se vyskytuje podpovrchová porozita s většími průměry pórů. Největší koncentrace pórů je na pravé straně vzorku, kde docházelo k největšímu zachycování inertního plynu, jehož směr je naznačen na obrázku 19.

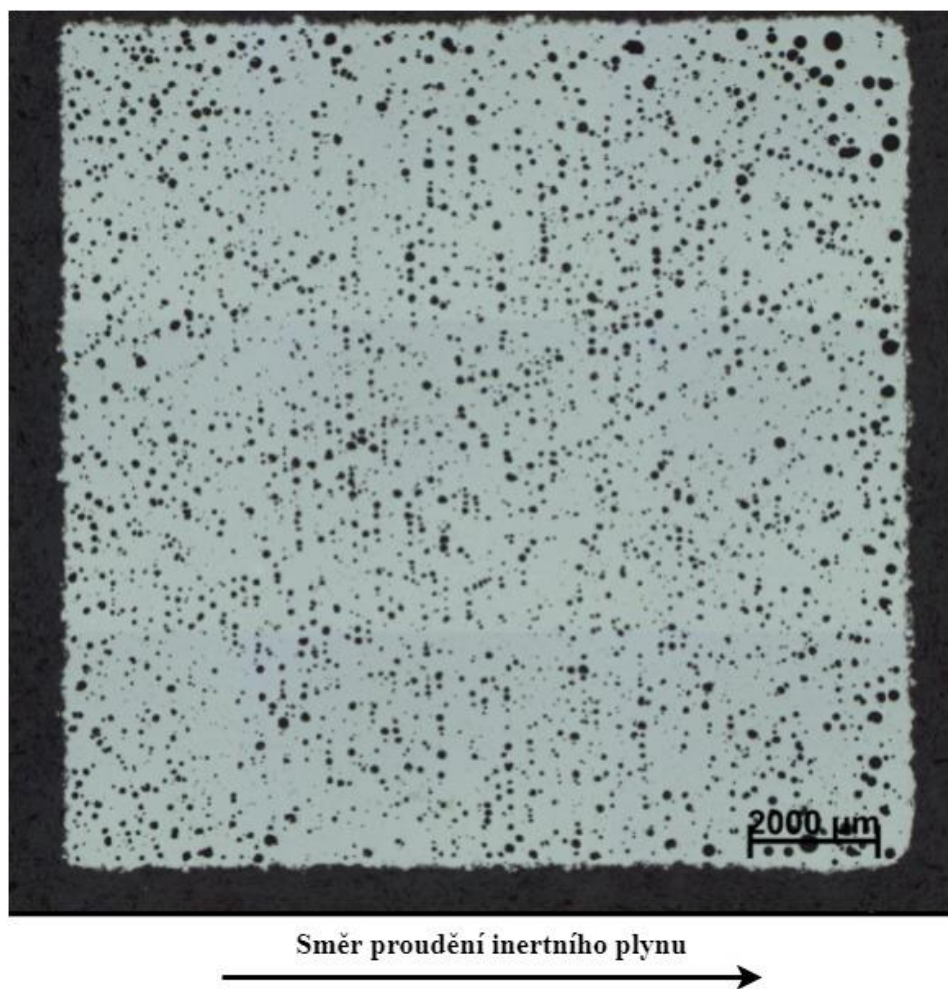


Směr proudění inertního plynu



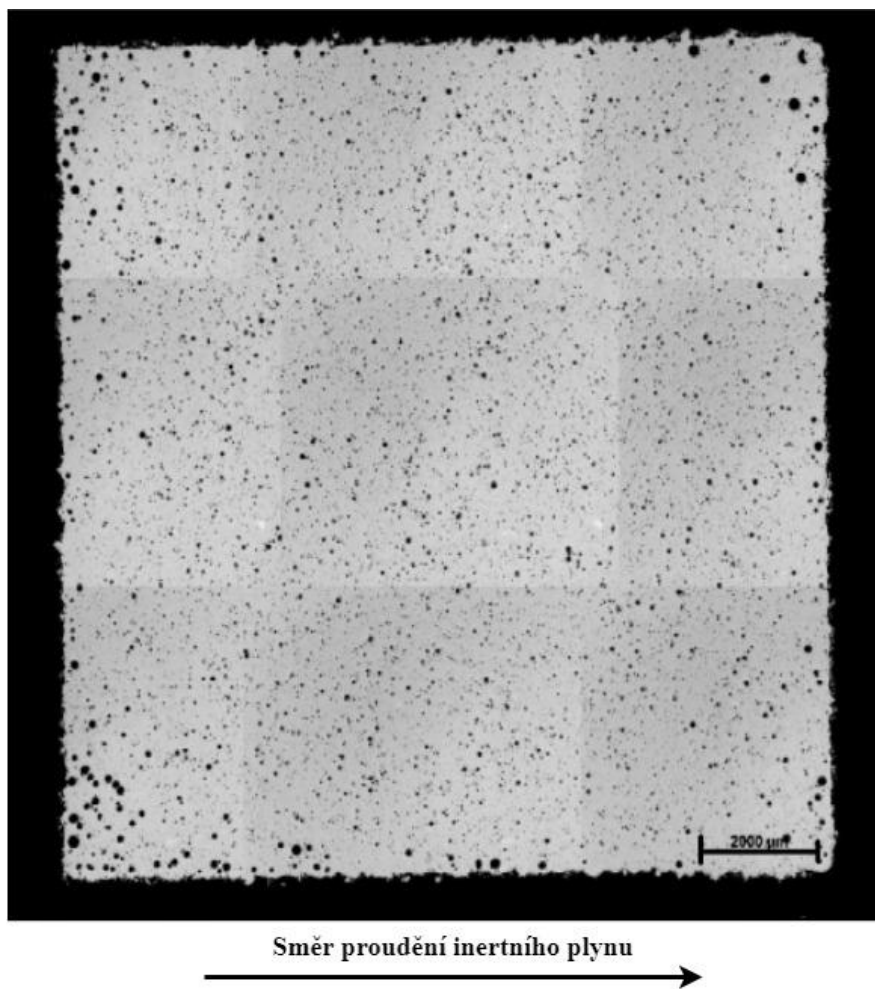
Obr. 19 Přehledový snímek vzorek č. 1

U vzorku č. 2 byla naměřena porozita 10,566 %. Na obrázku 20 si lze povšimnout, že zejména ve střední části vzorků je patrný trend tvorby pórů v jedné linii. Tyto póry mají velikost cca 145 μm . V okrajích vzorků se vyskytuje zvýšená porozita v podobě podpovrchové porozity. Celková velikost pórů se pohybovala v rozmezí 40 – 280 μm .



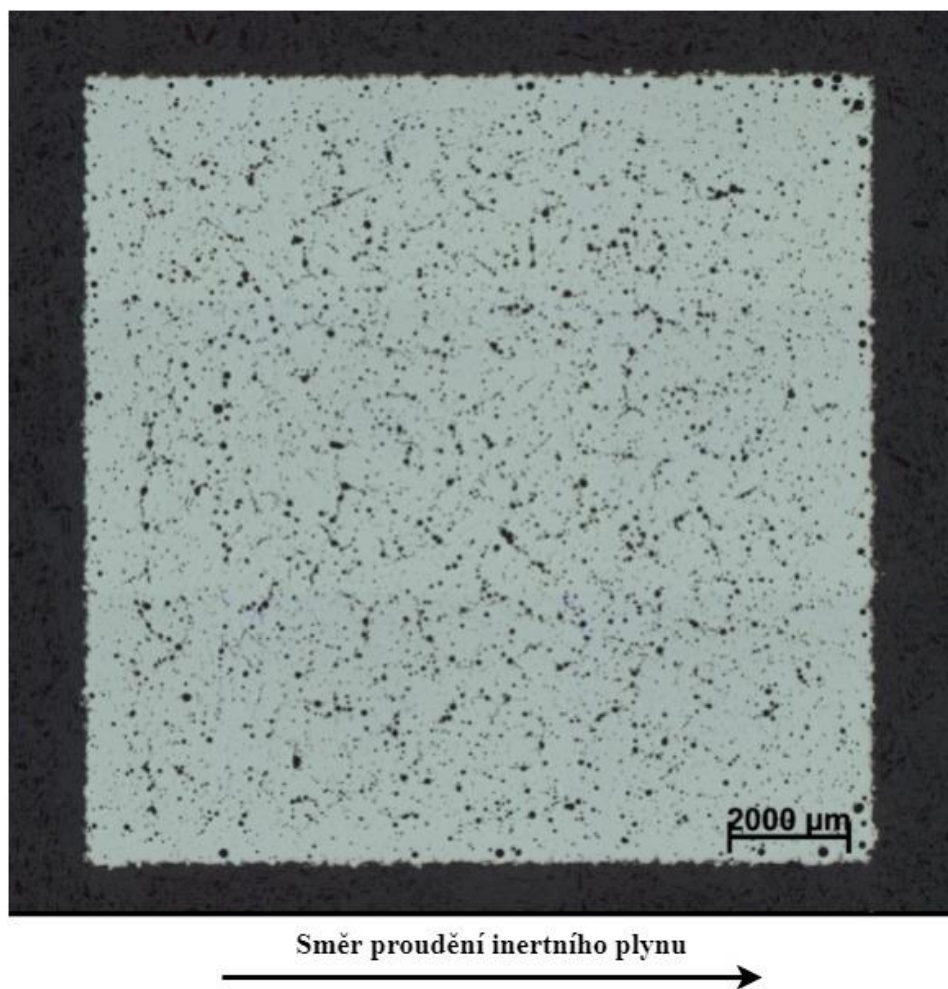
Obr. 20 Přehledový snímek vzorek č. 2

Přehledový snímek vzorku č. 3 (obrázek 21) s výslednou porozitou 4,055 %. U vzorku lze vidět velkou koncentraci převážně velmi malých pórů kulovitěho tvaru. Pouze v rozích vzorku je menší výskyt plynných pórů o větších rozměrech. Velikosti pórů se pohybují v rozmezí 19 – 190 μm .



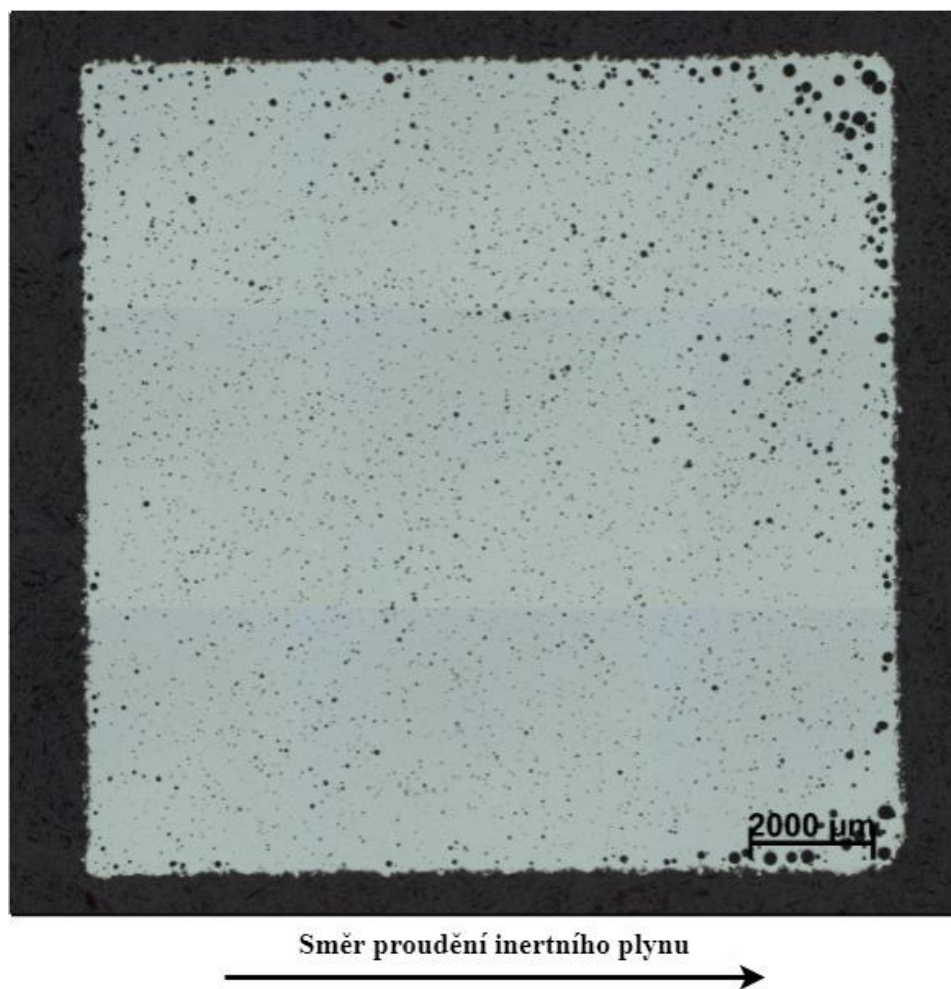
Obr. 21 Přehledový snímek vzorek č. 3

Přehledový snímek vzorku č. 4 je zobrazen na obrázku 22. Plošná porozita vzorku je 8,425 %. Velikosti pórů se pohybují v rozmezí 20 – 230 μm . Lze zde pozorovat zvýšený výskyt mikrotrhlin. Po okrajích se vyskytuje menší podpovrchová porozita plyných pórů, které vznikly zachycením inertního plynu.



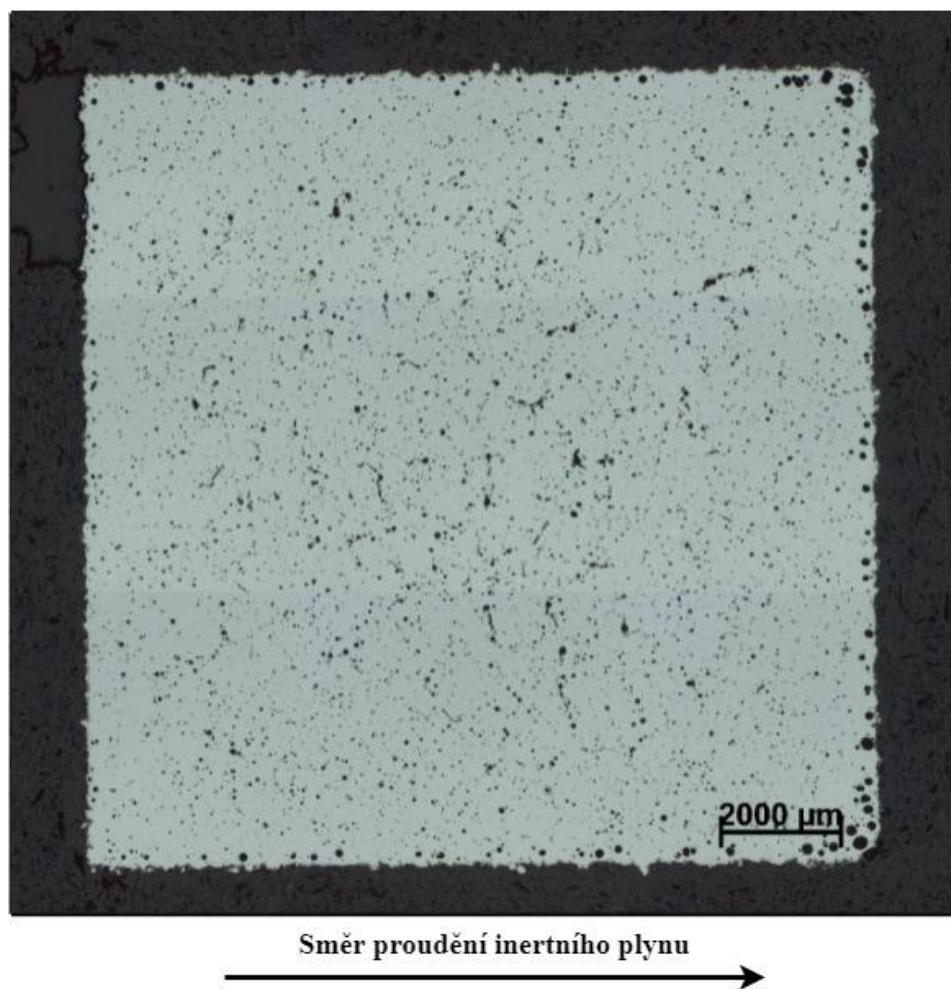
Obr. 22 Přehledový snímek vzorek č. 4

Přehledový snímek vzorku č. 5 (obrázek 23), který má plošnou porozitu 4,347 %. Lze pozorovat zvýšenou koncentraci menších pórů o velikosti pohybující se okolo 40 μm . Na pravé straně vzorku převážně v rozích je vysoká koncentrace větších pórů pravidelného kulovitého tvaru, které jsou o velikosti okolo 200 μm .



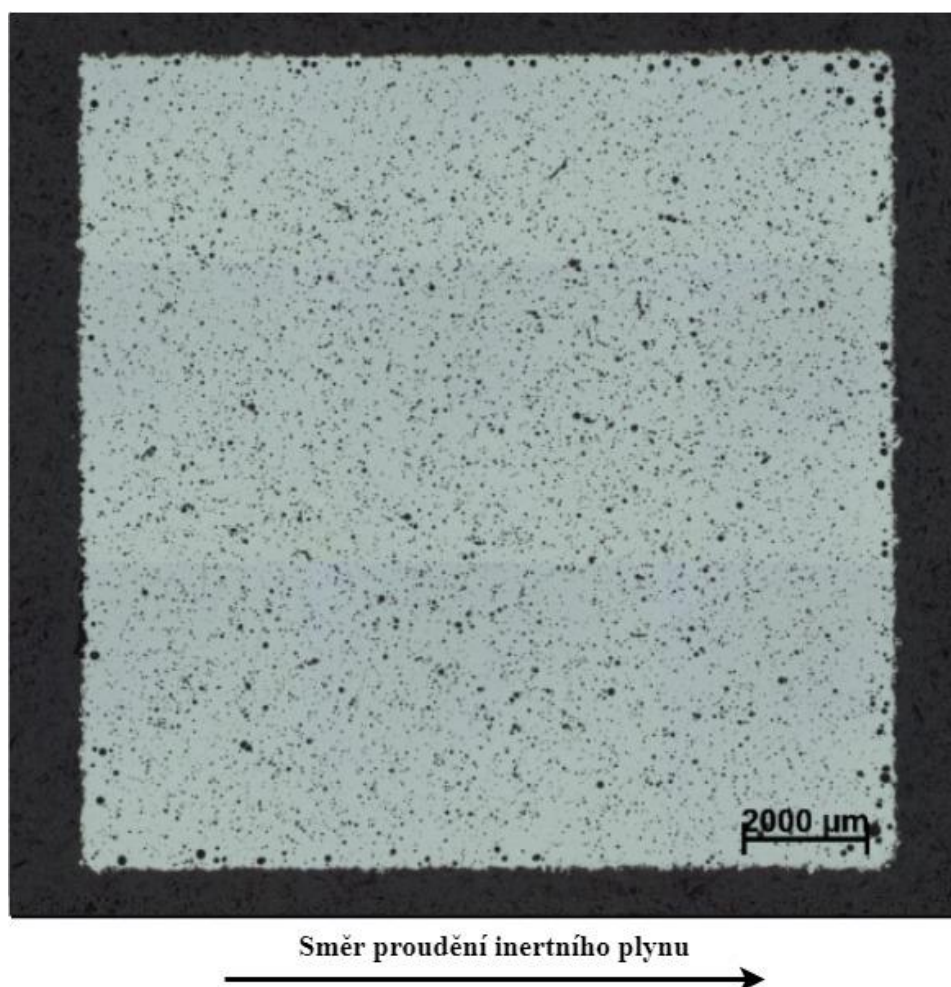
Obr. 23 Přehledový snímek vzorek č. 5

Výsledná naměřená porozita vzorku č. 6, který je zobrazen na obrázku 24, je 6,2 %. Vzorek je rovnoměrně pokryt malými póry kulovitého tvaru po celé jeho ploše. Na pravém okraji je vidět výskyt podpovrchové porozity. V oblasti středu vzorku se v menší míře vyskytují póry s navazujícími trhlinami. Rozmezí velikostí vytvořených pórů je 40 – 190 μm .



Obr. 24 Přehledový snímek vzorek č. 6

Naměřená plošná porozita vzorku č. 7 (obrázek 25) byla 8,456 %. Přehledový snímek prokázal poměrně hustý výskyt velikostně podobných pórů v rozmezí 50 – 120 μm . Převážná většina pórů má menší kulovitý tvar, lze vidět také menší výskyt podpovrchové porozity a výskyt trhlin.



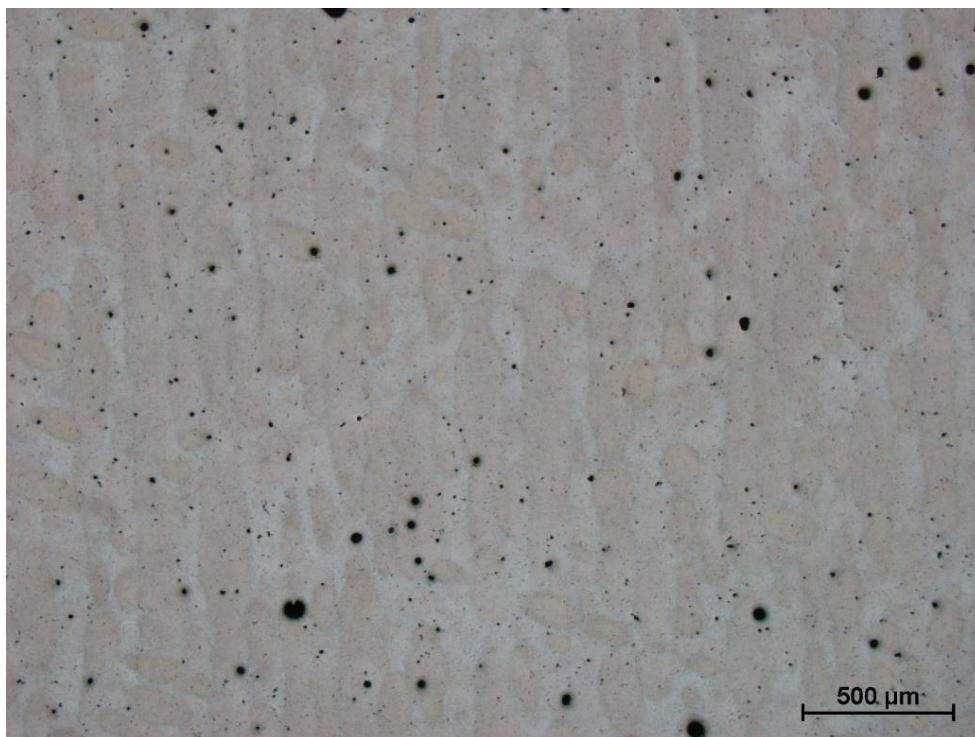
Obr. 25 Přehledový snímek vzorek č. 7

Ze získaných výsledků porozity, které lze vidět v tabulce 3, je patrné, že vzorkem s nejnižší porozitou je vzorek č. 1. Má tedy nejvyšší relativní hustotu o hodnotě 96,057 %, a proto byl podroben další studii.

Tab. 3 Průměrné hodnoty porozity a hodnoty relativní hustoty

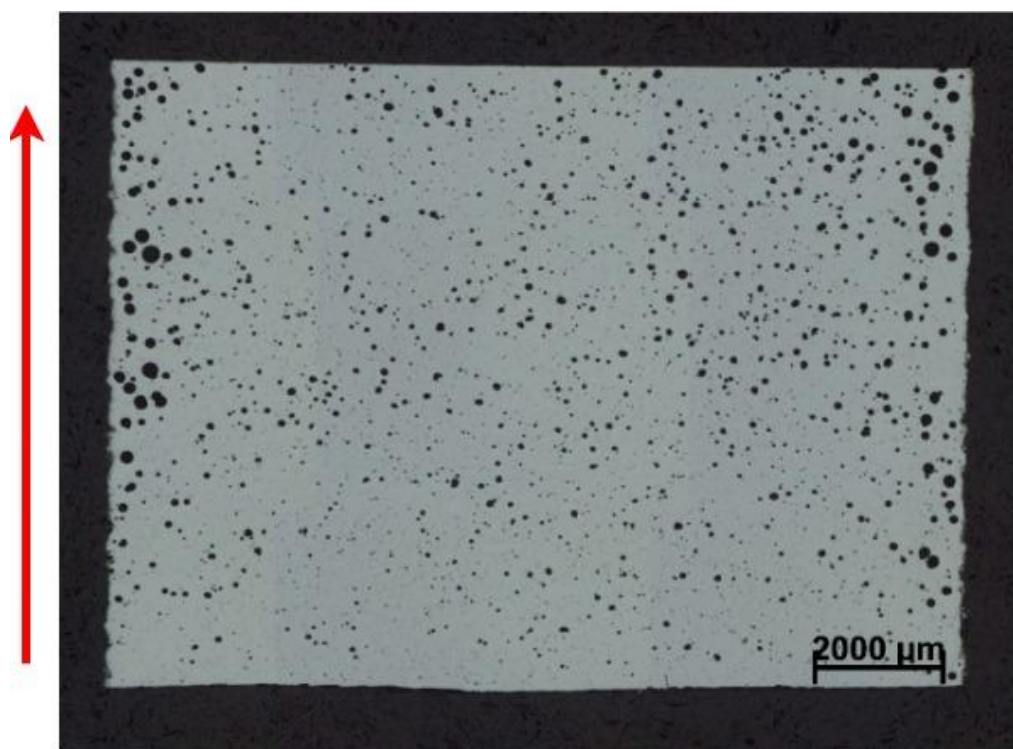
Číslo vzorku		1	2	3	4	5	6	7
Porozita	[%]	3,943	10,566	4,055	8,425	4,347	6,2	8,456
Relativní hustota	[%]	96,057	89,434	95,945	91,575	95,653	93,8	91,544

Bližší analýzy byly provedeny na vzorku č. 1. V první řadě byla pozorována mikrostruktura kolmé roviny na směr stavby, tedy roviny XY. Na obrázku 26 je zobrazen snímek mikrostruktury při zvětšení 50×. Mikrostruktura je tvořena jednotlivými laserovými drahami, které nejsou po celé délce spojitě. Lze vidět, že v dalších vrstvách je směr skenování pootočen.



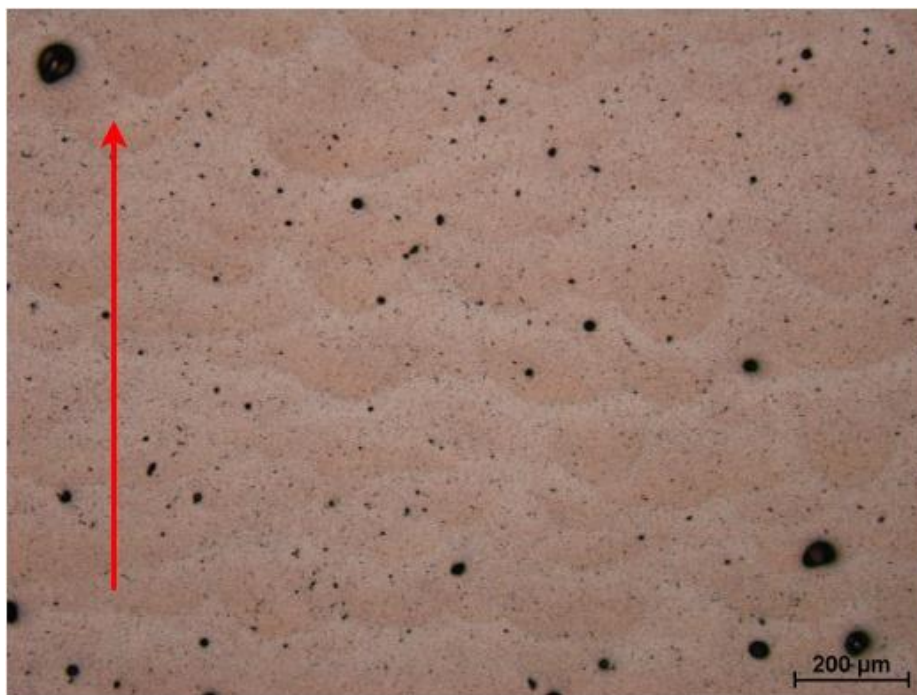
Obr. 26 Snímek mikrostruktury roviny XY, vzorek č. 1, 50×

Na obrázku 27 je zobrazen přehledový snímek vzorku č. 1 roviny YZ, rovnoběžné se směrem stavby. Při pohledu na snímek je patrná podpovrchová porozita na levé i pravé straně vzorku. Naopak ve spodní části je hustota porozity velmi nízká a směrem k horní části se koncentrace pórů zvyšuje.



Obr. 27 Přehledový snímek roviny YZ s vyznačeným směrem stavby, vzorek č. 1

Mikrostrukturu podélného řezu, roviny YZ, vzorku č. 1 (obrázek 28) tvoří SLM buňky. SLM buňka je zobrazením laserové dráhy v podélném řezu a je ohraničena fúzní hranicí. Na obrázku 28 lze pozorovat rozdílnou velikost SLM buněk při protavování více vrstvami. Některé SLM buňky dosahují výšky až 160 μm , což je více než trojnásobek tloušťky vrstvy prášku. Na obrázku 29 lze vidět SLM buňku s fúzní hranicí při zvětšení 500 \times a zároveň velice jemnozrnnou mikrostrukturu vzorku.



Obr. 28 Snímek mikrostruktury roviny YZ s vyznačeným směrem stavby, vzorek č. 1, 100 \times



Obr. 29 Mikrostruktura roviny YZ, 500 \times

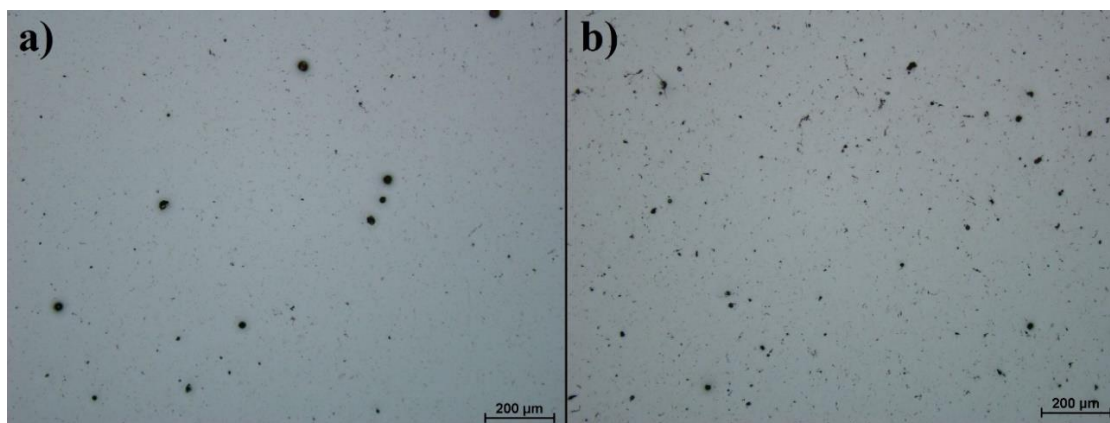
8 Diskuze

Při výrobě součásti technologií SLM je snahou dosáhnout co nejnižší porozity (resp. nejvyšší relativní hustoty). Vyšší hodnoty porozity mají negativní vliv na výsledné mechanické vlastnosti součásti. Zvolením optimálních procesních parametrů lze docílit nižších hodnot porozity.

Tab. 4 Výsledné hodnoty porozity s procesními parametry

Číslo vzorku	Porozita	Hustota laserové energie	Výkon laseru	Rychlost skenování	Vzdálenost drah	Tloušťka vrstvy	Překrytí drah
	[%]	[J/mm ³]	[W]	[mm/s]	[mm]	[mm]	[%]
1	3,943	58,48	150	475	0,108	0,05	50
2	10,566	50,53	210	475	0,176	0,05	30
3	4,055	50,91	210	750	0,110	0,05	50
4	8,425	29,20	150	750	0,137	0,05	30
5	4,347	44,19	180	612,5	0,133	0,05	40
6	6,200	37,27	180	805	0,120	0,05	40
7	8,456	37,01	138	612,5	0,120	0,05	40

Z výsledků v tabulce 4 si lze povšimnout, že vzorek č. 1 a vzorek č. 3 mají velice podobnou naměřenou porozitu. Při výrobě vzorku č. 1 byla použita vyšší vstupní hustota laserové energie ($E = 58,48 \text{ J/mm}^3$) než u vzorku č. 3 ($E = 50,91 \text{ J/mm}^3$). Procesní parametry obou vzorků se výrazněji liší ve výkonu laseru (vzorek č. 1 = 150 W, vzorek č. 3 = 210 W) a v rychlosti skenování (vzorek č. 1 = 475 mm/s, vzorek č. 3 = 750 mm/s). Lze tedy upozorovat, že i když byl vzorek č. 3 tisknut pomocí nižší hustoty laserové energie, byla jeho plošná porozita srovnatelná se vzorkem č. 1. Tato skutečnost může být dána použitím vyššího výkonu laseru. Z obrázku 30a je patrné, že vzorek č. 1 je tvořen spíše většími póry, zatím co vzorek č. 3 (obrázek 30b) je pokryt menšími póry s větší koncentrací. Oba tyto vzorky ovšem dosáhli nejlepších hodnot porozity především díky použití nejvyšších hustot laserové energie a největšího překrytí jednotlivých laserových drah 50 %, než při tisku ostatních vzorků.

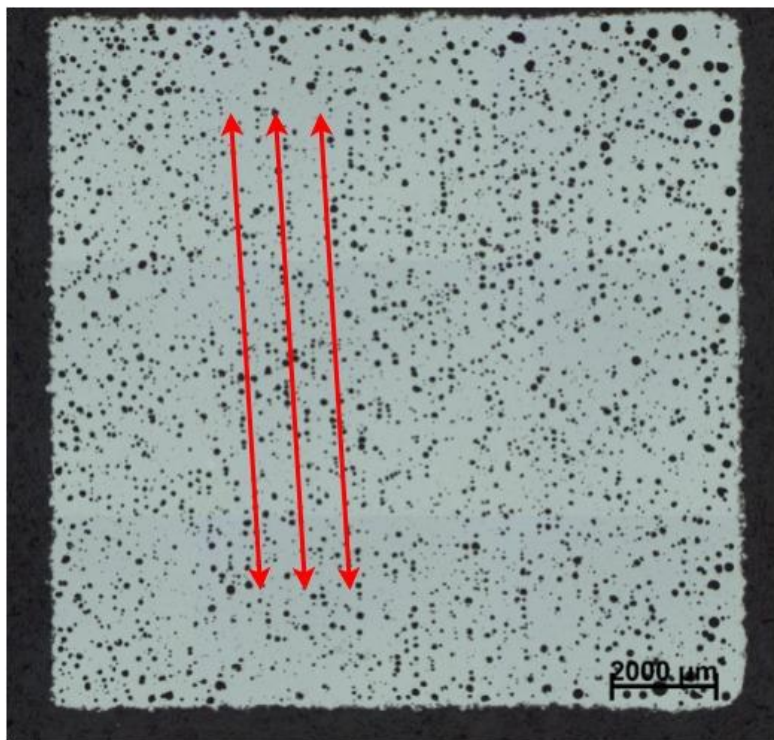


Obr. 30 Detailní snímky a) vzorek č. 1, b) vzorek č. 3, 100×

Studie [16] pozoruje chování slitin hořčíku při SLM, zkoumá vliv procesních parametrů na porozitu materiálu AZ61. Pro srovnání se vzorkem č. 1 byl vybrán z této literatury vzorek, který byl tisknut stejnou hustotou laserové energie ($E = 58,5 \text{ J/mm}^3$) s procesními parametry: $LP = 150 \text{ W}$, rychlost skenování $SS = 800 \text{ mm/s}$, vzdálenost laserových drah $H = 0,08 \text{ mm}$ a tloušťka vrstvy prášku $LT = 0,04 \text{ mm}$. Výsledná plošná porozita vzorku z literatury je 8,4 %, zatímco u vzorku č. 1 je 3,943 %. Nižší skenovací rychlost vzorku č. 1 znamená delší interakci laseru s práškem, a to vede k zvýšení roztavení prášku a snížení tvorby pórů. [16]

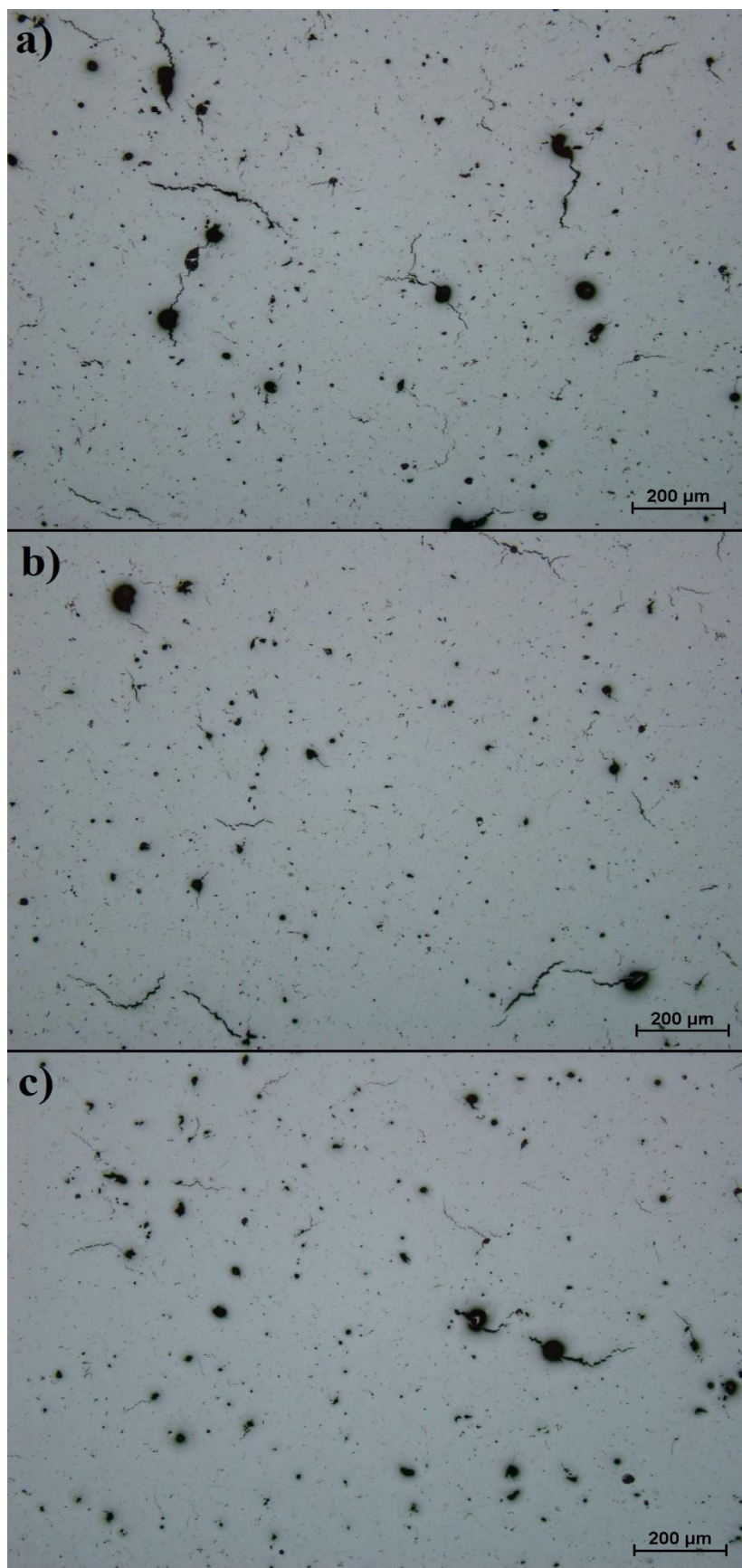
Autoři [24] zkoumali vliv procesních parametrů na mikrostrukturu a relativní hustotu materiálu AZ91D. Při použití hustoty laserové energie $E = 166,7 \text{ J/mm}^3$ ($LP = 200 \text{ W}$, $SS = 333,3 \text{ mm/s}$, $H = 0,09 \text{ mm}$, $LT = 0,04 \text{ mm}$) dosáhli nejnížší hodnoty porozity 0,48 % (resp. nejvyšší relativní hustoty 99,52 %). Pro porovnání výsledků vzorku č. 1 byl vybrán z této literatury vzorek s podobnou vstupní hustotou laserové energie $E = 68,2 \text{ J/mm}^3$ ($LP = 200 \text{ W}$, $SS = 666,6 \text{ mm/s}$, $H = 0,11 \text{ mm}$, $LT = 0,04 \text{ mm}$). Výsledná plošná porozita tohoto vzorku z literatury je přibližně 6,8 %, což je vyšší než porozita u vzorku č. 1 (3,943 %).

Vzorek č. 2 byl vyhodnocen jako vzorek s nejvyšší plošnou porozitou o hodnotě 10,566 %. Pro tisk tohoto vzorku byl použit výkon laseru $LP = 210 \text{ W}$, rychlost skenování $SS = 475 \text{ mm/s}$ a vzdálenost laserových drah $H = 0,176 \text{ mm}$. Z těchto procesních parametrů byla vypočítána hustota laserové energie $E = 50,53 \text{ J/mm}^3$, což je třetí nejvyšší použitá hustota laserové energie v rámci tohoto experimentu. Zásadní vliv na zvýšení porozity má menší překrytí jednotlivých drah laseru (30 %). Při menším překrytí, tedy při poměrně větší vzdálenosti laserové dráhy, dochází k méně kvalitnímu spojení práškového materiálu i při použití dostatečně velké hustoty laserové energie. Tuto skutečnost lze dát do souvislosti s rozmístěním pórů, viz obrázek 31, kde jsou některé póry v řadě (laserové dráhy).



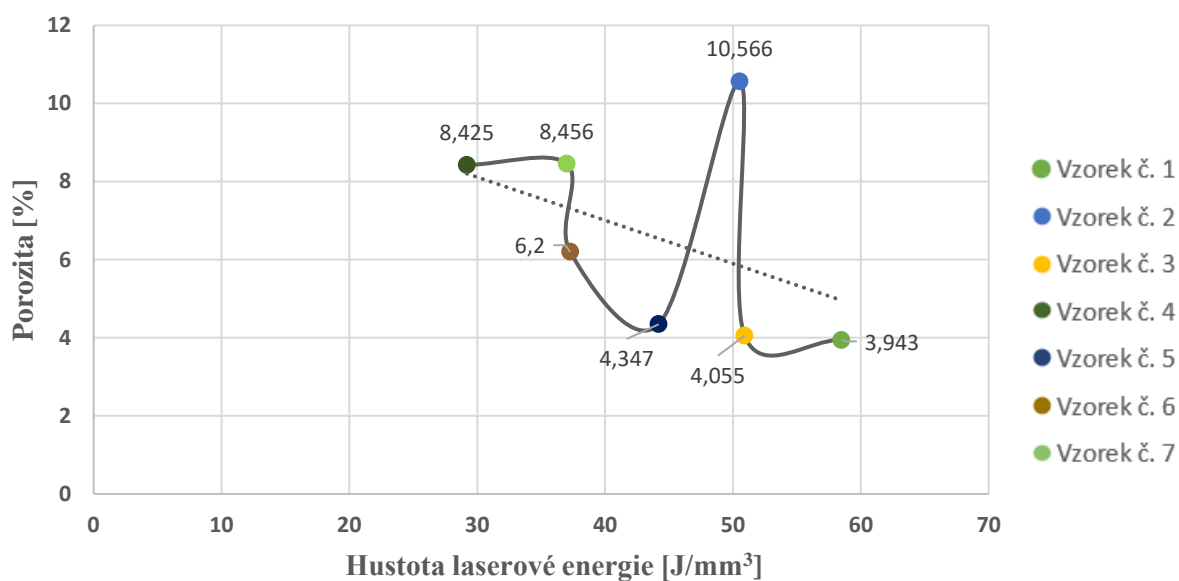
Obr. 31 Přehledový snímek se směrem laserových drah vzorek č. 2

Vzorky č. 4, 6 a 7 jsou si svojí strukturou velmi podobné, především výskytem trhlin. K tvorbě trhlin dochází při rychlém tuhnutí taveniny. [25] To se týká také těchto vzorků, jelikož jejich přivedená hustota laserové energie je poměrně nízká (vzorek č. 4 – $E = 29,2 \text{ J/mm}^3$, vzorek č. 6 – $E = 37,27 \text{ J/mm}^3$, vzorek č. 7 – $E = 37,01 \text{ J/mm}^3$), doba tuhnutí taveniny je tedy krátká. Na obrázku 32 můžeme vidět, že při zvyšující hustotě laserové energie dochází k menšímu výskytu trhlin. Trhliny často vznikají mezi více póry, jak lze vidět na obrázku 32a.



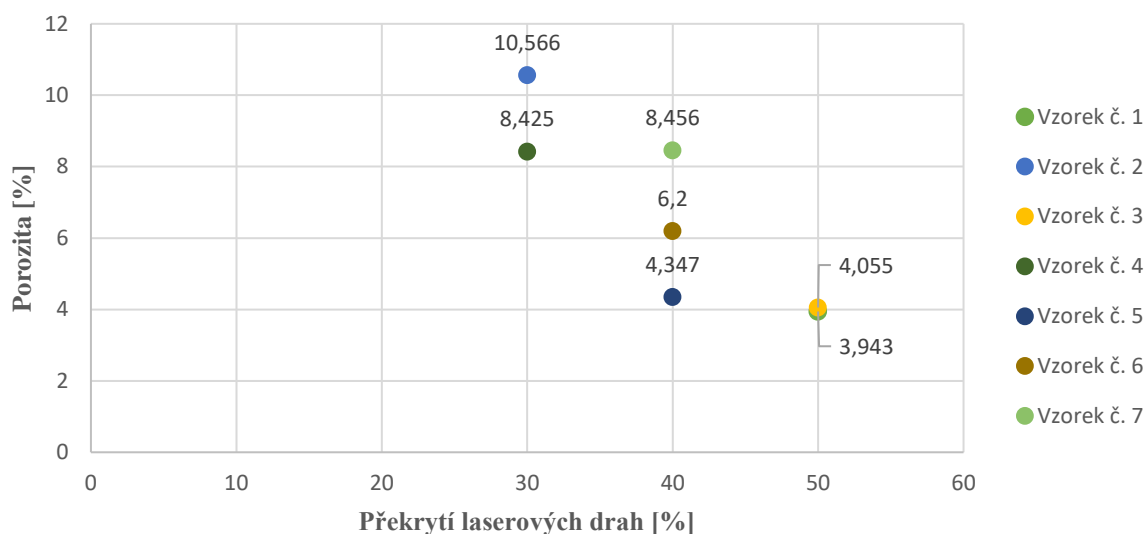
Obr. 32 Detailní snímky a) vzorek č. 4 ($E = 29,2 \text{ J/mm}^3$), b) vzorek č. 6 ($E = 37,27 \text{ J/mm}^3$), c) vzorek č. 7 ($E = 37,01 \text{ J/mm}^3$), $100 \times$

Naměřené hodnoty porozity vzorků 1–7, které jsou uvedeny v tabulce 4, byly vloženy do grafu závislosti vstupní hustoty energie na porozitě vzorků (obrázek 33). Při pohledu na tento obrázek je vidět klesající tendence porozity s rostoucí hustotou laserové energie. Avšak tato tendence je ve dvou případech vychýlena. V případě vzorku č. 2 můžeme vidět výrazné zvýšení porozity, při téměř stejné hustotě laserové energie, jako u vzorku č. 3. Toto zvýšení porozity lze spojovat s menším překrytím jednotlivých drah laseru u vzorku č. 2. Vychýlení hodnoty plošné porozity vzorku č. 7, při použití téměř stejné hodnoty hustoty laserové energie jako u vzorku č. 6, lze přikládat využitím nízkého výkonu laseru.



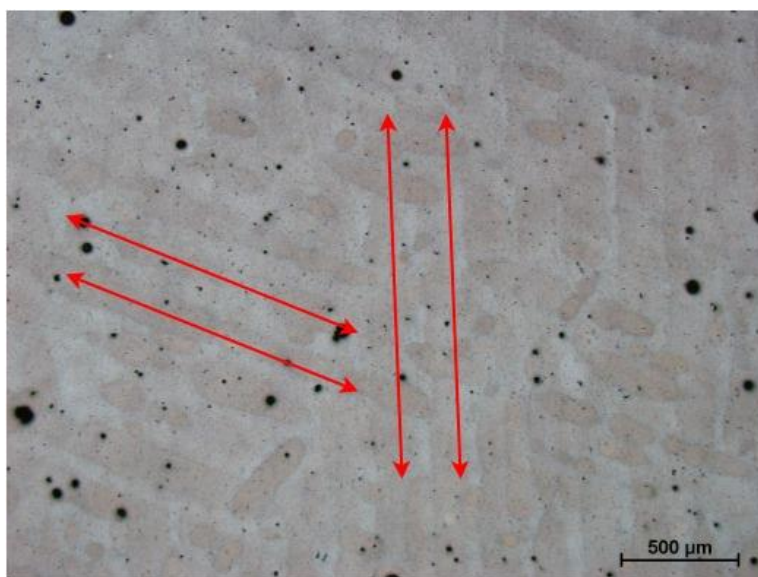
Obr. 33 Závislost vstupní hustoty laserové energie na porozitu

Nelze tedy vynechat vliv překrytí jednotlivých laserových drah. Jak lze vidět z obrázku 34, se zvyšující částí překrytí jednotlivých laserových drah klesá hodnota plošné porozity. Nejlepších výsledků porozit pak bylo dosaženo při překrytí 50 %, naopak nejhorších při překrytí 30 %.



Obr. 34 Závislost překrytí laserových drah na porozitu

Mikrostruktura příčného řezu, roviny XY, vzorku č. 1 je tvořena laserovými drahami. Na obrázku 35 lze pozorovat, že jednotlivé laserové dráhy nejsou po celé jejich délce spojitě. Tento jev lze vidět i v detailním snímku mikrostruktury vzorku č. 1 při zvětšení $200\times$ na obrázku 36. Podobných výsledků mikrostruktury dosáhla také studie [18] při použití materiálu AZ91D a vstupní hustoty laserové energie $E = 166,7 \text{ J/mm}^3$. Příčinou nespojitosti drah je pootočení směru skenování při tvorbě jednotlivých vrstev, které je prováděno za účelem kvalitnějšího propojení. Při tvorbě jedné vrstvy v určitém směru dochází také k přetavení několika vrstev tvořených v jiném směru, a tím dochází k narušení spojitosti laserových drah.

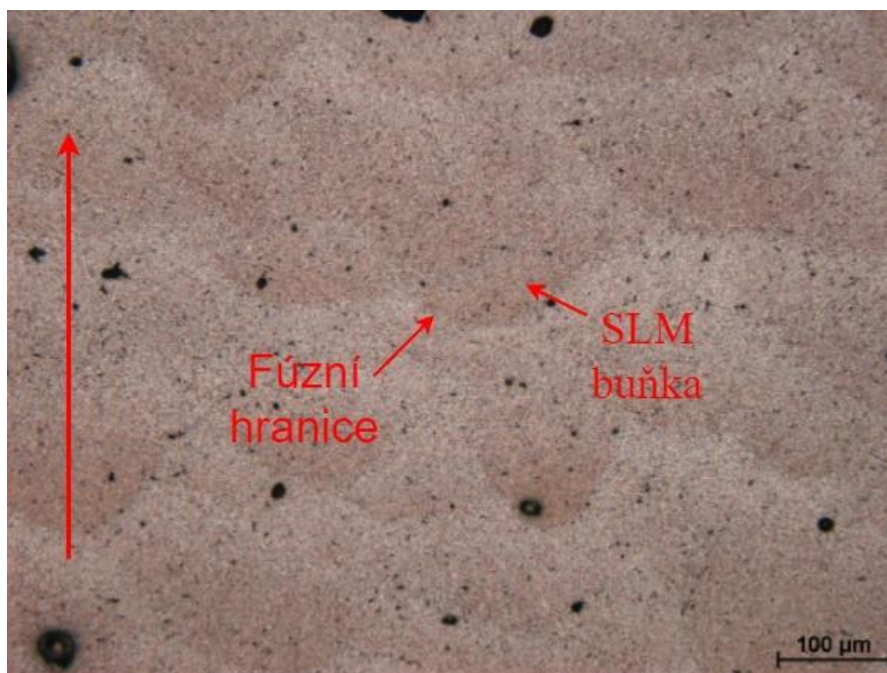


Obr. 35 Mikrostruktura roviny XY se směry laserový drah dvou vrstev, $50\times$



Obr. 36 Mikrostruktura roviny XY, 200×

Při pohledu na obrázek 37 lze vidět mikrostrukturu podélného řezu, roviny YZ, která je tvořena SLM buňkami ohraničenými fúzními hranicemi. Opět zde lze vidět podobnost mikrostruktury roviny YZ vzorku č. 1 s mikrostrukturou, které dosáhli autoři [18] při své studii. Tato tvorba mikrostruktury je typická pro součásti z materiálu AZ91D zpracovaných technologií SLM.



Obr. 37 Mikrostruktura roviny YZ, se směrem stavby, 200×

9 Závěry

- Nejlepších výsledků plošné porozity (resp. relativní hustoty) 3,943 % (resp. 96,057 %) bylo dosaženo u vzorku č. 1. Tento vzorek byl tisknut při nejvyšší použité hustotě laserové energie $E = 58,48 \text{ J/mm}^3$ (LP = 150 W, SS = 475 mm/s, H = 0,108 mm, LT = 0,05 mm) a také s největším překrytím 50 %.
- Pozorování mikrostruktury roviny XY vzorku č. 1 ukázalo nespojitost laserových drah vlivem pootočení směru skenování při tvorbě jednotlivých vrstev. Mikrostruktura roviny YZ vykazala typickou strukturu tvořenou SLM buňkami ohraničenými fúzními hranicemi.
- Porovnání vzorku č. 1 s literárními výsledky o srovnatelné vstupní hustotě laserové energie ukázalo spíše příznivé výsledky této studie, jelikož naměřená plošná porozita vzorku č. 1 byla nižší. Některé studie však ukázali, že při zvýšení hustoty laserové energie lze dosáhnout i příznivějších výsledků.

10 Seznam použité literatury

- [1] MANAKARI, Vyasraj, Gururaj PARANDE a Manoj GUPTA. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloy Powders. *Metals* [online]. 2017, 7(1) [cit. 2021-5-20]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met7010002>
- [2] KAUFUI, V. Wong a Hernandez ALDO. *A Review of Additive Manufacturing* [online]. 16.8.2012, , 10 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>
- [3] DRÁPALA, Jaromír. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs: Magnesium, its alloy and Mg-admixture binary systems*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0579-0.
- [4] Začínáme s 3D tiskem kovů #4: Příprava výroby v řešení QuantAM. *Konstruktor.cz* [online]. Brno: Vydavatelství Nová média, 2019, 21. 5. 2017 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.konstruktor.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-4-priprava-tisku-v-reseni-quantam/>
- [5] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. 3. vydání. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [6] HOMOLA, Jan. ENCYKLOPEDIE 3D TISKU: Stereolitografie. *3D-tisk.cz: vše o 3D tisku a aditivní výrobě* [online]. Brno: Vydavatelství Nová média, 2019, 26. 2. 2013 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
- [7] JASTER, Mark. 3D Printing Processes. *PrintSpace 3D* [online]. 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/?fbclid=IwAR3oVYBEI5vUxT81PjrcT1CNAB59Ks2g0x6PzKdt0fJ3Hu_MS WF5XvSf0Y
- [8] Selective Laser Sintering 3D printing service. *Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs, 2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/3d-printing/sls/>
- [9] HOMOLA, Jan. ENCYKLOPEDIE 3D TISKU: Selective Laser Sintering. *3D-tisk.cz: vše o 3D tisku a aditivní výrobě* [online]. Brno: Vydavatelství Nová média, 2019, 15. 2. 2019 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
- [10] Přehled technologií 3D tisku. *Dk metal prominent* [online]. Nový Jičín: Webdesign Amenit, 2012, 09.01.2018 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [11] PALERMO, Elizabeth. What is Laminated Object Manufacturing? *Live science* [online]. New York: Future US [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [12] Fused Deposition Modeling (FDM): 3D printing with filaments. *Sculpteo* [online]. Villejuif: Sculpteo, 2009 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/fdm-fused-deposition-modeling-definition/>
- [13] HLAWICZKA, Petr. Rychlá výroba prototypů: klíč k intenzivním aerodynamickým programům v F1. *F1news.cz* [online]. Újezd u Brna: Active Solutions, 13.9.2013 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://f1news.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypu-klic-k-intenzivnim-aerodynamickym-programum-v-f1-video>

- [14] RAZVAN, Udriou. *POWDER BED ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEMS AND ITS APPLICATIONS* [online]. 2012, (10), 122-129 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-selective-laser-melting-Custompartnet-2012_fig5_275533064
- [15] ABOULKHAIR, Nesma T., Marco SIMONELLI, Luke PARRY, Ian ASHCROFT, Christopher TUCK a Richard HAGUE. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting. *Progress in Materials science* [online]. Nottingham, 2019, (106) [cit. 2021-5-20]. ISSN 0079-6425. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007964251930060X?via%3Dihub>
- [16] LIU, Shuai a Hanjie GUO. Balling Behavior of Selective Laser Melting (SLM) Magnesium Alloy. *Materials* [online]. 2020, **13**(16) [cit. 2021-5-20]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/16/3632>
- [17] SHUAI, Liu, Yang WENSHENG, Shi XIAN, Li BIN, Duan SHENGCHAO, Guo HANJIEN a Guo JING. Influence of laser process parameters on the densification, microstructure, and mechanical properties of a selective laser melted AZ61 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2019, (808) [cit. 2021-5-20]. ISSN 0925-8388.
- [18] YAP C. Y., CHUA C. K., DONG Z. L., LIU Z. H., ZHANG D. Q., LOH L. E. a SING S. L. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, **2** [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- [19] LI, Ruidi, Jinhui LIU, Yusheng SHI, Li WANG a Wei JIANG. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, **59**, 1025–1035 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-011-3566-1>
- [20] LIU, Shuai a Hanjie GUO. Balling Behavior of Selective Laser Melting (SLM) Magnesium Alloy. *Materials* [online]. 2020, **13**(16) [cit. 2021-5-20]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: [10.3390/ma13163632](https://doi.org/10.3390/ma13163632)
- [21] BAICHENG, Zhang, Liao HANLIN a Coddet CHRISTIAN. Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9%Al powder mixture. *Materials & Design* [online]. 2012, (34), 753-758 [cit. 2021-5-20]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.061>
- [22] SAMES, W. J., F. A. LIST, S. PANNALA, R. R. DEHOFF a S. S. BABU. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews* [online]. 2016, (61), 315-360 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- [23] JIANGFENG, Song, She JIA, Chen DAOLUN a Pan FUSHENG. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium and Alloys* [online]. 2020, **1**(8), 1-41 [cit. 2021-5-20]. ISSN 2213-9567. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.02.003>

- [24] KAIWEN, Wei, Gao MING, Wang ZEMIN a Zeng XIAOYAN. Effect of energy input on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted AZ91D magnesium alloy. *Materials Science and Engineering* [online]. 2014, (611), 212-222 [cit. 2021-5-20]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.092>
- [25] OLAKANMI, E. O., COCHRANE, R. F., DALGARN K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*. 2015, vol. 74, s. 401–477. ISSN 0079-6425.

11 Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky	Jednotky	Popis
2D	-	Dvojměrné
3D	-	Trojměrné
ABS	-	Akrylonitril-butadien-styren
AM	-	Aditivní technologie
CAD	-	Počítačem podporované kreslení
CST	-	„Central of scanning track“
DMLS	-	Přímé kovové laserové slinování
E	[J/mm ³]	Hustota laserové energie
EDS	-	Energická disperzní spektroskopie
FDM	-	Depozitní modelování
H	[mm]	Vzdálenost jednotlivých drah
LENS	-	Přímá metoda navařování laserem
LOM	-	Laminování
LP	[W]	Výkon laseru
LT	[mm]	Tloušťka vrstvy prášku
ORL	-	„Overlapping region“
PC	-	Polykarbonát
PPSF	-	Polyfenylsulfon
PVA	-	Polyvinylalkohol
SEM	-	Skenovací elektronový mikroskop
SLA	-	Stereolitografie
SLM	-	Selektivní laserové tavení
SLS	-	Selektivní laserové spékání
SS	[mm/s]	Rychlost skenování
STL	-	Standardní teslační soubor
UV	-	Ultrafialové záření